

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Doris Županić

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Vesna Alar

Student:

Doris Županić

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Vesni Alar dipl. ing. na ukazanom povjerenju, pruženom znanju i pomoći tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Ivanu Stojanoviću dipl. ing. na stručnim savjetima, te na velikoj pomoći i uloženom trudu.

Zahvaljujem se svim djelatnicima Laboratorija za zaštitu materijala i kolegama na pruženoj pomoći i ugodnoj atmosferi tijekom izrade diplomskog rada.

Također bih se zahvalila svojim roditeljima na pruženoj ljubavi, potpori, razumijevanju i strpljenju te što su mi bili čvrsti oslonac tijekom cijelog studiranja. Zahvalila bih se i svojoj rodbini i prijateljima koji su vjerovali u moj trud i uspjeh tijekom obrazovanja.

Doris Županić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	V
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS OZNAKA	IX
SAŽETAK.....	X
SUMMARY	XI
1. UVOD	1
2. VJETROENERGETIKA.....	3
2.1. Povijest vjetroatrakcije	3
2.2. Vjetroatrakcija danas.....	5
3. VJETAR.....	8
3.1. Vjetroatracija.....	8
3.2. Kinetička atrakcija vjetroa	9
4. KONSTRUKCIJSKI OBLICI VJETROTURBINA	10
4.1. Vjetroatrakcije s horizontalnim vratilom rotora	11
4.1.1. Vjetroatrakcije s horizontalnim vratilom rotora s obzirom na broj lopatica.....	12
4.2. Vjetroatrakcije s vertikalnim vratilom rotora	15
5. GLAVNI DIJELOVI VJETROTURBINE	17
5.1. Rotor.....	17
5.2. Lopatice rotora	17
5.3. Stup i temelj vjetroatracije	18
5.4. Kočioni sustav	18
5.5. Električni generator.....	19
5.6. Zakretnik	19

5.7. Gondola ili kućište vjetroturbine.....	20
6. VRSTE VJETROELEKTRANA	21
6.1. Vrste vjetroelektrana prema instaliranoj snazi.....	21
6.1.1. Male vjetroelektrane	21
6.1.2. Velike vjetroelektrane.....	22
6.2. Vrste vjetroelektrana s obzirom na položaj.....	22
6.2.1. Kopnene vjetroelektrane	22
6.2.2. Offshore vjetroelektrane	23
6.2.2.1. Priobalne vjetroelektrane	23
6.2.2.2. Plutajuće vjetroelektrane	24
6.2.2.3. Zračne vjetroelektrane	25
7. ZAŠTITA PREMAZIMA	26
7.1. Zaštita organskim prevlakama	27
7.1.1. Klasifikacija premaza	27
7.1.2. Komponente premaza	28
7.1.2.1. Vezivo	28
7.1.2.2. Otapalo.....	30
7.1.2.3. Pigmenti.....	30
7.1.2.4. Punila.....	31
7.1.2.5. Aditivi.....	31
7.1.3. Sustav premaza	32
7.1.4. Mehanizmi zaštitnog djelovanja premaza	33
7.1.5. Priprema površine.....	34
7.1.6. Nanošenje premaza.....	35
7.2. Vodorazrjediivi premazi.....	35
7.2.1. Svojstva vodorazrjeditivih premaza.....	35

7.2.1.1.	Sušenje vodorazrjedivih premaza	37
7.2.1.2.	Prednosti i nedostaci vodorazrjedivih premaza	37
7.2.2.	Vrste vodorazrjedivih premaza	39
7.2.3.	Primjena vodorazrjedivih premaza	40
8.	KOROZIJSKA ZAŠTITA VJETROTURBINA	42
8.1.	Odabir odgovarajućeg sustava premaza	42
8.1.1.	Korozivnost okoliša	42
8.1.2.	Vrste površina koju treba zaštititi	44
8.1.3.	Tražena trajnost sustava premaza	45
8.1.4.	Planiranje postupka nanošenja boje	45
8.2.	Ključne radnje uspješne korozijske zaštite	45
8.2.	Korozijska zaštita onshore vjetroturbina	47
8.2.1.	Sustavi korozijske zaštite stupa onshore vjetroturbina	47
8.2.2.	Sustavi korozijske zaštite dijelova onshore vjetroturbina	48
8.3.	Korozijska zaštita <i>offshore</i> vjetroturbina	50
8.3.1.	Korozijska područja stupova <i>offshore</i> vjetroturbina	50
8.3.1.1.	Uronjena zona	51
8.3.1.2.	Zapljusnuta zona	51
8.3.1.3.	Atmosferska zona	51
8.3.2.	Sustavi korozijske zaštite stupova <i>offshore</i> vjetroturbina	52
8.3.3.	Sustavi korozijske zaštite dijelova <i>off-shore</i> vjetroturbina	55
9.	EKSPERIMENTALNI DIO	59
9.1.	Cilj i svrha eksperimentalnog istraživanja	59
9.2.	Odabrani sustavi premaza	61
9.3.	Ispitivanje fizikalnih i kemijskih svojstava sustava premaza	62
9.3.1.	Mjerenje debljine suhog filma sustava premaza	63

9.3.2.	Ispitivanje sjaja površine sustava premaza	65
9.3.3.	Ispitivanje tvrdoće sustava premaza	66
9.3.4.	Ispitivanje otpornosti sustava premaza na udar	68
9.3.5.	Ispitivanje u vlažnoj komori	70
9.3.6.	Ispitivanje u slanoj komori	73
9.3.7.	Ispitivanje prionjivosti premaza	76
9.3.8.	Ispitivanje svojstava adhezije i kohezije.....	80
9.4.	Ispitivanje elektrokemijskih svojstava	85
9.4.1.	Mjerenje korozijskog potencijala, E_{kor}	87
9.4.2.	Mjerenje otpora premaza, R_p	88
9.5.	Mikrostrukturna ispitivanja.....	90
9.5.1.	Određivanje mikrostrukture optičkim svjetlosnim mikroskopom.....	91
9.5.2.	SEM i EDX analiza	92
10.	ZAKLJUČAK	97
	LITERATURA.....	99
	PRILOZI.....	101

POPIS SLIKA

Slika 1.	Heronova vjetrenjača za pokretanje orgulja [1]	3
Slika 2.	Mlin na vjetar s područja Afganistana i Irana- 7. stoljeće [2]	4
Slika 3.	Povećanje dimenzija i snage vjetroatregata od 1980. do 2020. godine [2]	5
Slika 4.	Ukupni instalirani kapaciteti vjetra u EU u 2014. godini [3]	6
Slika 5.	Godišnja instalirana snaga vjetra od 2000. do 2014. godine (GW) [3]	7
Slika 6.	Godišnja ukupna instalirana snaga <i>offshore</i> vjetroturbina (MW) [4]	7
Slika 7.	Konstruktivske izvedbe vjetroturbine s obzirom na položaj vratila [6]	10
Slika 8.	Upwind rotor [7]	11
Slika 9.	Downwind rotor [7]	11
Slika 10.	Rotor s tri lopatice [9]	13
Slika 11.	Rotor s dvije lopatice [10]	13
Slika 12.	Rotor s jednom lopaticom [11]	14
Slika 13.	Američka "farmerska" vjetrenjača [12]	14
Slika 14.	Darrieus-ov vjetroatregat [13]	15
Slika 15.	Horizontalna izvedba Darrieus-ove vjetroturbine [14]	16
Slika 16.	Podjela vjetroelektrana prema instaliranoj snazi [2]	21
Slika 17.	Gansu vjetropark u Kini, najveća kopnena vjetroelektrana na svijetu [17]	22
Slika 18.	The London Array, najveća <i>offshore</i> vjetroelektrana na svijetu [18]	24
Slika 19.	Prikaz koncepta lutajućih vjetroatregata [2]	25
Slika 20.	Koncept visinskih zračnih agregata, Kite Gen [19]	25
Slika 21.	Prikaz površina koje treba izbjegavati prilikom nanošenja AKZ [2]	46
Slika 22.	Korozijom zahvaćene zone stupa <i>offshore</i> vjetroatregata [23]	50
Slika 23.	Moderni sustav antikorozijske zaštite dijelova <i>offshore</i> vjetroturbine [2]	55
Slika 24.	Uzorci sustava premaza A, vodorazrjedivi	61
Slika 25.	Uzorci sustava premaza B, na bazi otapala	62
Slika 26.	Elcometer 456, uređaj za određivanje debljine suhog filma premaza	63
Slika 27.	Postupak mjerenja debljine suhog filma sustava premaza A i B	63
Slika 28.	Uređaj za određivanje kategorije sjaja površina sustava premaza	65
Slika 29.	Postupak određivanja tvrdoće premaza metodom olovaka	67

Slika 30.	Olovke različitih tvrdoća za ispitivanje tvrdoće premaza	67
Slika 31.	Provedeno ispitivanje tvrdoće olovkama na uzorcima A12 i B10	68
Slika 32.	Uteg za utvrđivanje otpornosti premaza na udar s postavljenim uzorkom	69
Slika 33.	Uzorci A2 i B1 podvrgnuti ispitivanju otpornosti na udar	69
Slika 34.	Vlažna komora	70
Slika 35.	Uzorci sustava premaza A i B prije ispitivanja u vlažnoj komori	71
Slika 36.	Ascott S450 slana komora	73
Slika 37.	Uzorci sustava premaza A i B prije ispitivanja u slanoj komori	74
Slika 38.	Urezivanje kvadratne mreže	76
Slika 39.	Čišćenje kvadratne mrežice četkicom	76
Slika 40.	Uklanjanje samoljepljive trake s kvadratne mrežice	77
Slika 41.	Oprema za provođenje pulloff testa, Elcometer 108	80
Slika 42.	Uređaj za elektrokemijsku impedancijsku spektroskopiju	85
Slika 43.	Ispitna ćelija	86
Slika 44.	Električni ekvivalentni krug elektrokemijskog sustava za sustave premaza A i B [29]	88
Slika 45.	Nyquist-ovi dijagrami za uzorke A1 i B2	89
Slika 46.	Bode-ovi dijagrami za uzorke A1 i B2	90
Slika 47.	Pripremljeni uzorci sustava premaza A i B za mikrostrukturna ispitivanja	90
Slika 48.	Mikrostruktura sustava premaza A, povećanje 500 x	91
Slika 49.	Mikrostruktura sustava premaza B, povećanje 500 x	91
Slika 50.	Skenirajući elektronski mikroskop	92
Slika 51.	Postavljen uzorak u mjerni uređaj	92
Slika 52.	SEM i EDX analiza sustava premaza A	94
Slika 53.	SEM i EDX analiza sustava premaza B	96

POPIS TABLICA

Tablica 1. Fizikalna i kemijska svojstva najučestalijih veziva u premazima [20]	29
Tablica 2. Svojstva najznačajnijih pigmenata [20]	30
Tablica 3. Peteroslojni sustav premaza [20].....	32
Tablica 4. Prednosti i nedostaci vodorazrjedivih premaza [20]	37
Tablica 5. Usporedba različitih vrsta premaza [20]	38
Tablica 6. Svojstva dviju različitih vrsta premaza na bazi vode [20].....	40
Tablica 7. Kategorije atmosferske korozivnosti prema standardu ISO 12944 [21]	43
Tablica 8. Kategorije vode i tla u skladu sa standardom ISO 12944 [21].....	44
Tablica 9. Gubitak debljine/mase nezaštićenog niskougljičnog čelika	44
Tablica 10. Vremenska kategorizacija trajnosti prema HRN EN ISO 12944 [21]	45
Tablica 11. Sustav premaza za kategoriju korozivnosti C3 prema EN ISO 12944 [22].....	47
Tablica 12. Klasični sustav zaštite <i>onshore</i> vjetroturbine kategorije korozivnosti C3	49
Tablica 13. Iznos napredovanja korozije nezaštićenog čelika u priobalnom području [2]	52
Tablica 14. Sustav premaza za kategoriju korozivnosti C5 prema HRN EN ISO 12944 [22]	53
Tablica 15. Sustav premaza za C5M, atmosferska zona, prema NORSOK M 501[22]	54
Tablica 16. Sustav premaza za Im2, uronjena zona, prema NORSOK M 50 [22].....	54
Tablica 17. Sustava zaštite <i>offshore</i> vjetroturbine (C5-M) prema Slici 23. [2]	56
Tablica 18. Projektirani sustavi premaza prema EN ISO 12944, 5. dio.....	60
Tablica 19. Projektirani sustavi premaza na bazi vode	60
Tablica 20. Odabrani sustavi premaza za daljnja ispitivanja	61
Tablica 21. Debljine suhog filma sustava premaza A i B	64
Tablica 22. Kategorije sjaja prema Marine Coatings Manual, u skladu s ISO 2813 [25].....	65
Tablica 23. Kategorije sjaja za sustave premaza A i B	66
Tablica 24. Izmjerene tvrdoće sustava premaza A i B	68
Tablica 25. Otpornost na udar sustava premaza A i B	70
Tablica 26. Rezultati ispitivanja u vlažnoj komori sustava premaza A i B	72
Tablica 27. Rezultati ispitivanja u slanoj komori sustava premaza A i B.....	75
Tablica 28. Ocjena prionjivosti premaza prema normi HRN EN ISO 2409.....	77
Tablica 29. Rezultati <i>crosscut</i> testa sustava premaza A.....	78
Tablica 30. Rezultati <i>crosscut</i> testa sustava premaza B.....	79

Tablica 31. Redoslijed radnji prilikom provođenja pull-off metode.....	81
Tablica 32. Klasifikacija rezultata pulloff ispitivanja u skladu s EN ISO 4624 [26].....	82
Tablica 33. Rezultati <i>pulloff</i> testa sustava premaza A	83
Tablica 34. Rezultati pulloff testa sustava premaza B	84
Tablica 35. Uzorci A1 i B2 prije i nakon elektrokemijskog ispitivanja.....	87
Tablica 36. Vrijednosti korozijskog potencijala E_{kor} uzoraka A1 i B2	87
Tablica 37. Parametri za mjerenje otpora.....	88
Tablica 38. Rezultati EIS uzoraka A1 i B2	89

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
NDFT	μm	Nominalna debljina suhog filma
DSF	μm	Debljina suhog filma
E_{kor}	mV	Korozijski potencijal
C_{dl}	F	Kapacitet premaza
R_{p}	$\text{M}\Omega$	Otpor premaza
R_{el}	$\text{M}\Omega$	Otpor elektrolita
GFRP		Poliester ojačan staklenim vlaknima
CFRP		Plastika ojačana karbonskim vlaknima

SAŽETAK

Ovaj diplomski rad sastoji se od teorijskog i eksperimentalnog dijela. Teorijski dio obuhvaća osnovnu podjelu vjetroelektrana i definira glavne dijelove vjetroagregata. Osim toga, opisan je postupak zaštite od korozije organskim prevlakama te su prikazani uobičajeni sustavi zaštite dijelova *onshore* i *offshore* vjetroagregata.

U sklopu eksperimentalnog dijela projektirano je 10 sustava premaza za korozijsku zaštitu čeličnih stupova *offshore* vjetroelektrane kategorije korozivnosti C3. Projektirano je 5 sustava premaza na bazi otapala i 5 sustava premaza na bazi vode te je od svake skupine odabran po jedan sustav premaza za daljnja ispitivanja i konačnu usporedbu. Provedena su ispitivanja fizikalnih, kemijskih i elektrokemijskih svojstava odabranih premaza te je određena mikrostruktura premaza i njihov kemijski sastav. Izvršena je elektrokemijska impedancijska spektroskopija u svrhu određivanja otpora premaza. Sva ispitivanja provedena su kako bi se pokazala mogućnost primjene sustava premaza na bazi vode u istim uvjetima kojima su izloženi sustavi premaza na bazi otapala prilikom zaštite čeličnih stupova *offshore* vjetroagregata, a sve u cilju smanjenja hlapivih organskih spojeva i očuvanja okoliša.

Ključne riječi: vjetroelektrane, *offshore* vjetroagregati, toranj vjetroagregata, korozijska zaštita, sustav premaza, premazi na bazi vode

SUMMARY

This graduate thesis consists of theoretical and experimental parts. Theoretical part includes basic division of wind farms and defines the main components of wind turbines. In addition, a methods of corrosion protection of organic coatings are described and conventional protection systems of onshore and offshore wind turbine parts are presented.

As a part of experimental section there were designed 10 coating systems for steel tower corrosion protection of C3 corrosivity category. 5 water based and 5 solvent based coating systems are designed and one coating system, from each group, is selected for further tests and final comparison. Physical, chemical and electrochemical tests have been brought up as well as determination of microstructure and chemical composition of coatings. In order to determine the coating resistance, electrochemical impedance spectroscopy was performed. All tests were performed in order to show the possibility of applying the water based coating systems in the same conditions as solvent based coating systems are exposed during offshore wind turbines steel towers protection aiming to reduce volatile organic compounds and environmental protection.

Key words: wind power plants, offshore wind turbines, tower, corrosion protection, coating system, water based coatings

1. UVOD

U današnje vrijeme, kada je sve više razvijena svijest o potrebi očuvanja okoliša, konvencionalni načini proizvodnje energije sve su manje prisutni. Zalihe fosilnih goriva sve su manje, klimatske promjene su sve izraženije, sve je više onečišćenja, što stvara povoljne uvjete za sve većom primjenom energije dobivene iz obnovljivih i ekološki prihvatljivih izvora. Tu je svoju ulogu pronašla i vjetroenergija. Osim što ne emitira CO₂ i stakleničke plinove, energija vjetra je potpuno besplatna. Upravo iz tih razloga, vjetroidustrija bilježi ogroman napredak u posljednjih 10-ak godina. U Europi je 2014. godine zabilježeno ukupno 128 GW instalirane snage vjetroturbina, dok je već u prvoj polovici 2015. godine u Europi instalirano 584 *offshore* vjetroagregata.

Da bi se ovaj rastući trend nastavio, razvoj vjetroturbina mora ići u smjeru zadovoljenja osnovnih uvjeta: zadovoljavajuća iskoristivost, prihvatljiva cijena te jednostavno održavanje. Odabir odgovarajućih materijala, zaštita dijelova konstrukcije te primijenjene tehnologije izrade dijelova vjetroagregata preduvjet su za osiguranje kvalitete i trajnosti ovih uređaja.

Kako su konstrukcijski materijali podložni štetnim promjenama, njihova se uporabna vrijednost s vremenom smanjuje. Zbog toga je glavni cilj takve promjene eliminirati, ili ih svesti na najmanju moguću mjeru. Tu se javlja potreba za zaštitom dijelova konstrukcija vjetroagregata koja ponekad može imati presudnu ulogu u vijeku trajanja same konstrukcije. Najčešće se kao prvi izbor u zaštiti konstrukcijskih materijala nameće zaštita prevlačenjem. Upravo je zbog toga, izbor odgovarajućeg sustava premaza od presudne važnosti za kvalitetno funkcionisanje sustava zaštite materijala.

Poznato je da su *offshore* vjetroelektrane znatno više izložene agresivnijim medijima u odnosu na klasične *onshore* vjetroelektrane. Međutim, vjetroagregati pozicionirani u blizini morske obale također su znatno više izloženi korozivskom utjecaju. Odabir odgovarajućeg sustava premaza za zaštitu od korozije prije svega ovisi o korozivnosti okoliša u kojem se vjetroagregat nalazi, vrsti površine koju treba zaštititi te o traženoj trajnosti konstrukcije.

U ovom radu pažnja je posvećena zaštiti komponenata vjetroagregata izloženih atmosferi prosječnog saliniteta (kategorija korozivnosti C3-M), prije svega čeličnih stupova. Činjenica

je da, bez obzira o kojoj se kategoriji korozivnosti radi, te da li se radi o vjetroelektranama na kopnu ili moru, sustavi premaza za zaštitu stupova su primjenjivi u oba slučaja. Razlika je uglavnom u debljini filma te u broju komponenata premaza.

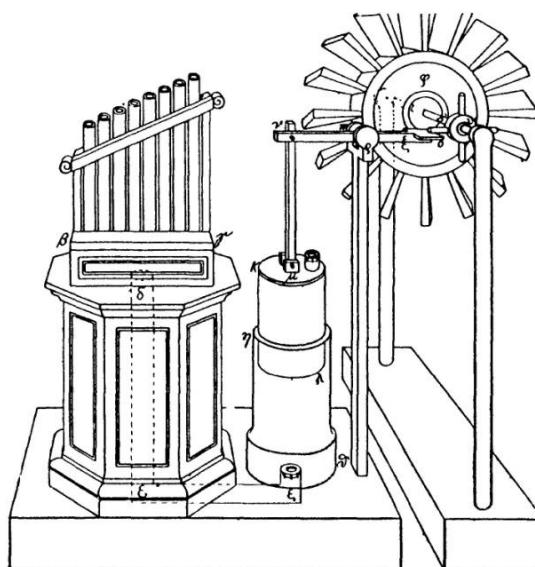
U korist očuvanja okoliša ide i primjena ekološki prihvatljivih premaza. Današnji trend ide u smjeru sve učestalije primjene premaza na bazi vode, jer osim što su ekološki prihvatljivi, pružaju i izvrsnu zaštitu u gotovo svim okolišnim uvjetima. Iako još uvijek u manjoj mjeri, cilj je da taj trend prevlada i u području vjetroenergetike. Zbog toga se sve veća pažnja posvećuje ispitivanjima kvalitete premaza na bazi vode za zaštitu dijelova vjetroagregata.

2. VJETROENERGETIKA

2.1. Povijest vjetroatnergetike

Primjena vjetroatnergetike seže u daleku povijest kada su čovječanstvu prvi puta omogućena daleka putovanja brodovima na jedra čija je uspješnost ovisila o nepredvidljivom obnovljivom izvoru energije - vjetru. Od tih davnih vremena pa sve do danas, jedrenjaci rade na potpuno isti način, koristeći isti čisti i sveprisutan izvor energije.

Najraniji poznati slučaj korištenja energije vjetra za pokretanje stroja putem rotora datira iz 1. stoljeća, kada se Heronova vjetrenjača koristila za pokretanje orgulja (Slika 1.).



Slika 1. Heronova vjetrenjača za pokretanje orgulja [1]

Pretpostavlja se da su se prve vjetrenjače za praktičnu primjenu pojavile već u 7. stoljeću na području između Afganistana i Irana (Slika 2.). Bile su to vjetrenjače s vertikalnom osi vrtnje te pravokutnim lopaticama s jedrima, a upotrebljavale su se za mljevenje i pumpanje vode.



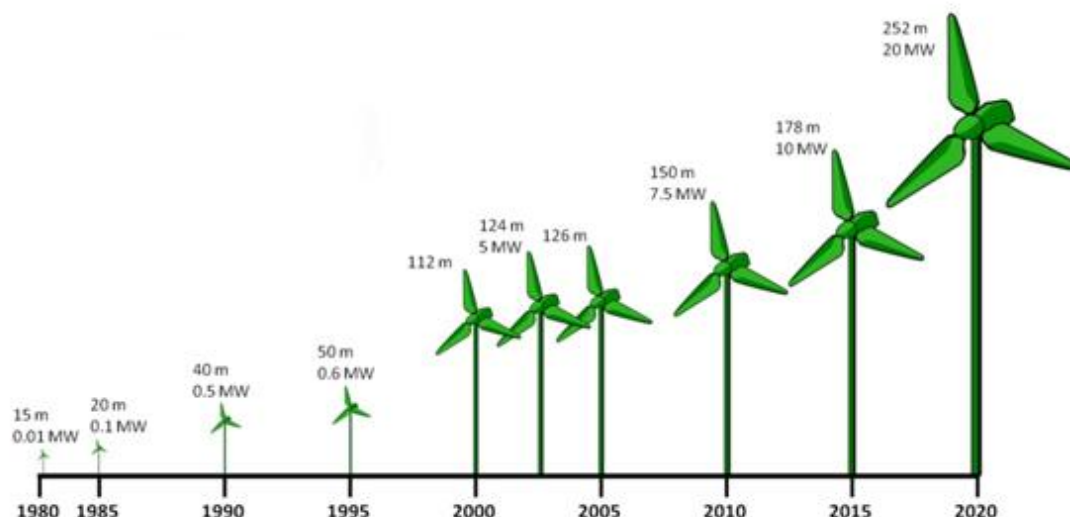
Slika 2. Mlin na vjetar s područja Afganistana i Irana- 7. stoljeće [2]

Početkom 1180-tih, vjetrenjače s horizontalnom osi vrtnje ušle su u širu primjenu u sjeverozapadnoj Europi, a bile su korištene za mljevenje. Do 19. stoljeća, u Danskoj je bilo postavljeno oko 2500 vjetrenjača za obavljanje mehaničkog rada, a po nekim procjenama imale su snagu od 30 MW. Na srednjem zapadu SAD-a, tijekom 19. stoljeća, ugrađen je veliki broj malih vjetrenjača, oko 6 milijuna, koje su se koristile za pokretanje pumpi za navodnjavanje.

Prvi vjetroatregat, visine 10 m s platnenim jedrima, izradio je prof. James Blyth u Škotskoj 1887. godine, a služio je za punjenje akumulatora za rasvjetu njegove kolibe. Bila je to prva kuća na svijetu koja se napajala električnom energijom proizvedenom iz energije vjetra. Tijekom 20. stoljeća, razvoj vjetroatregatije bio je ograničen zbog niskih cijena i dostupnosti drugih izvora energije, posebice nafte i ugljena. Kao odgovor na svjetsku naftnu krizu, 1970-ih godina započelo je moderno iskorištavanje energije vjetra kakvo i danas poznajemo. Od 1970. do 1980. godine, tržište vjetroatregata se razvilo od malih pojedinačnih vjetroatregata snaga 1 do 25 kW pa sve do polja međusobno povezanih vjetroatregata (vjetroatregatne) snaga od 50 pa sve do 600 kW. Vrhunac razvoja industrije vjetra postignut je u 1980-ima kada je u Kaliforniji instalirano 17 000 vjetroatregata, koji su proizvodili preko 3 TWh električne energije godišnje. U Danskoj je već postojao klasični danski tip vjetroatregata koji je i danas najrašireniji diljem svijeta. Do kraja 20. stoljeća, težište proizvodnje i ugradnje novih snaga preselilo se u sjevernu Europu, koja se danas smatra kolijevkom modernih vjetroatregata i industrije vjetra [1].

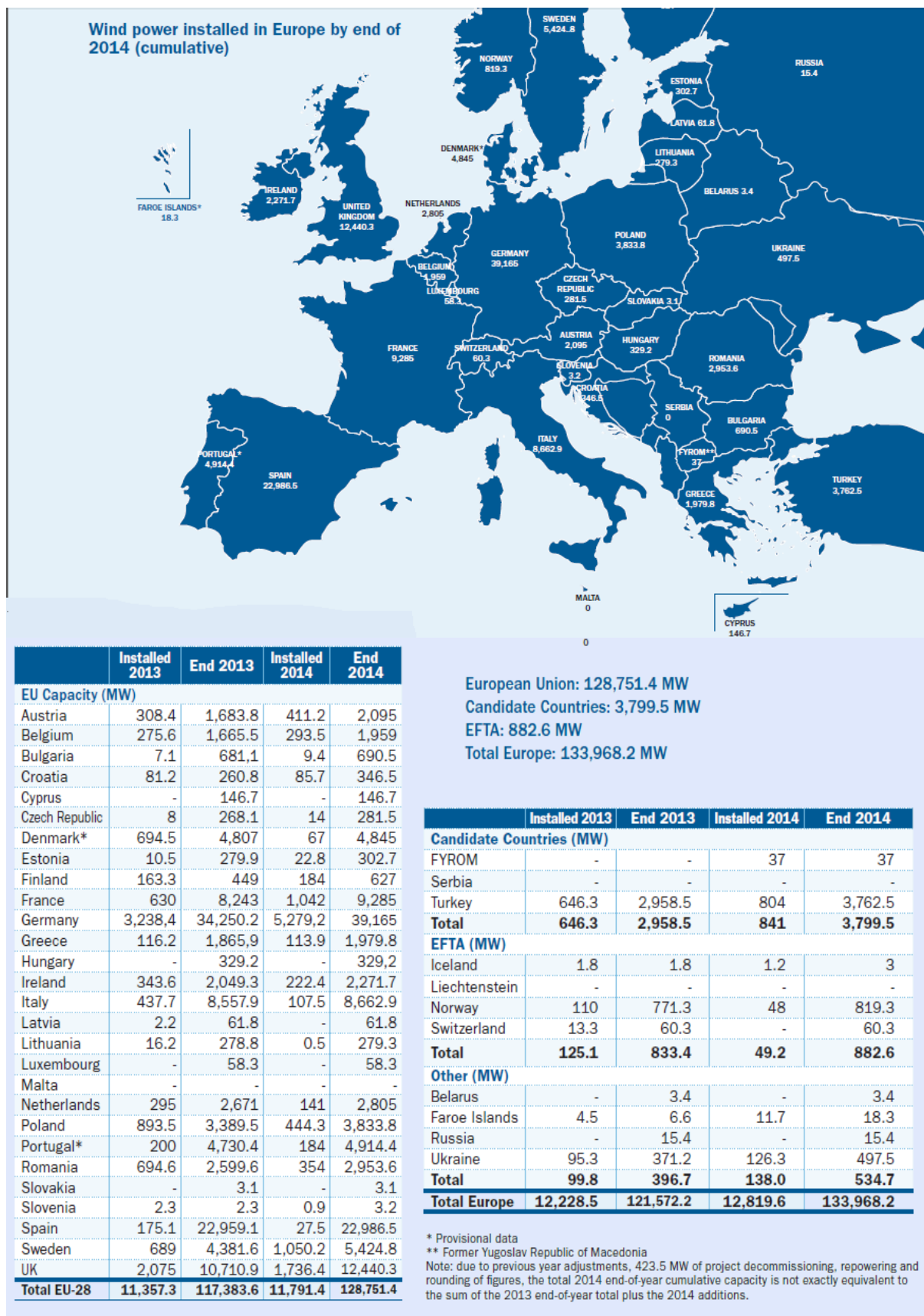
2.2. Vjetroenergetika danas

Unazad 14 godina, industrija vjetra napreduje enormnim tempom. Snage pojedinačnih agregata su se u manje od 20 godina povećale za 10 puta, a dimenzije su narasle više od dva puta (Slika 3.).



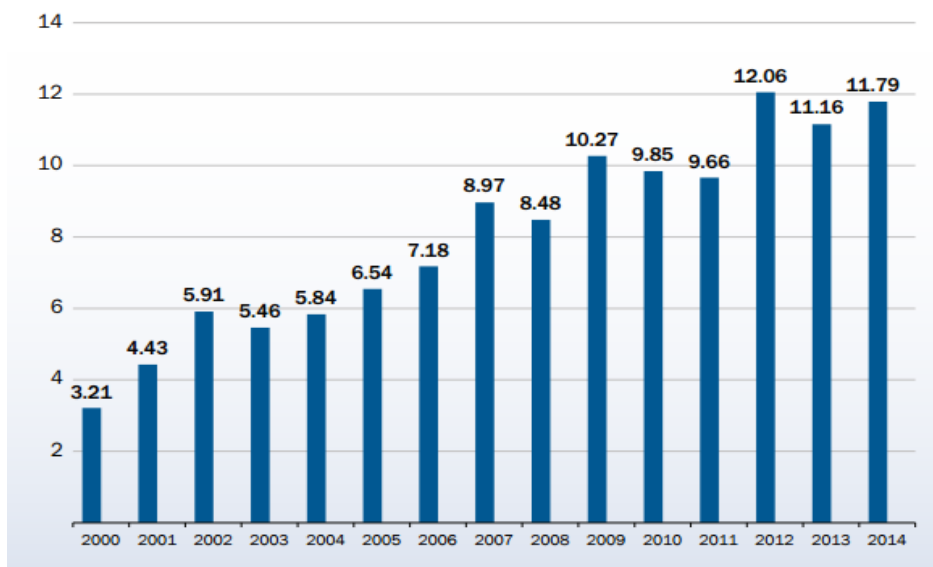
Slika 3. Povećanje dimenzija i snage vjetroagregata od 1980. do 2020. godine [2]

Trenutno je u EU instaliran kapacitet od 128,8 GW energije vjetra, gdje se otprilike 120,6 GW nalazi na kopnu, dok preko 8 GW otpada na vjetroagregate na moru. Njemačka je zemlja EU koja ima najveći udio u instaliranoj snazi, a prate ju redom Španjolska, Ujedinjeno Kraljevstvo i Francuska. Također, 15 je zemalja EU koje imaju instaliranu snagu mjerenu u gigavatima te 4 zemlje s više od 4 GW instalirane snage. Do kraja 2014., ukupni instalirani kapaciteti, proizvesti će, prema statistikama EWEA, 284 TWh električne energije, dovoljne da pokrije 10,2 % ukupne potrošnje EU, što je za 8 % više od prethodne 2013. godine (Slika 4.).



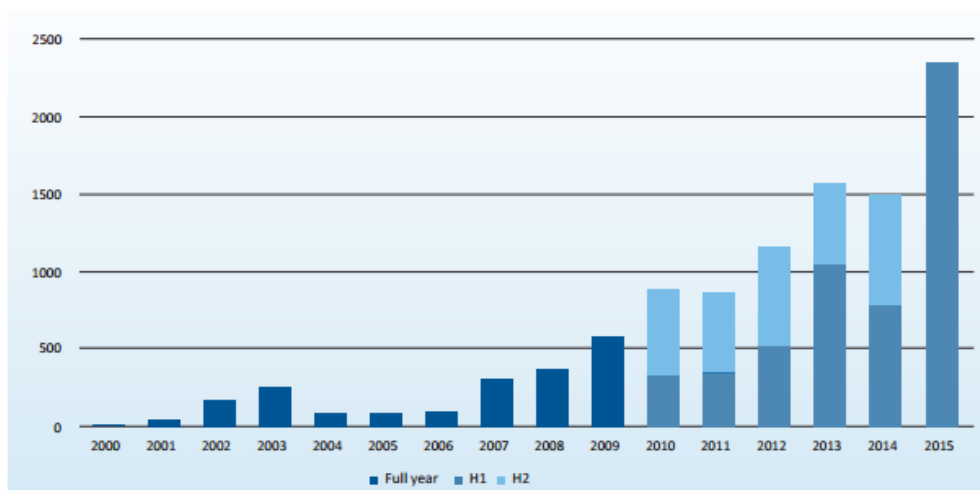
Slika 4. Ukupni instalirani kapaciteti vjetra u EU u 2014. godini [3]

Unutar EU, godišnja instalirana snaga vjetroturbina, u zadnjih 14 godina narasla je sa 3,2 GW u 2000. godini na 11,8 GW u 2014., s ukupnim godišnjim porastom od 9,8 % (Slika 5.).



Slika 5. Godišnja instalirana snaga vjetra od 2000. do 2014. godine (GW) [3]

Tijekom prvih šest mjeseci 2015. godine, u Europi je ukupno instalirano 584 komercijalnih *offshore*¹ vjetroturbina, ukupnog kapaciteta 2.342,9 MW (Slika 6.). Novi instalirani kapaciteti u prvoj polovici 2015. godine su 200 % veći nego u istom periodu u 2014. godine [4].



Slika 6. Godišnja ukupna instalirana snaga *offshore* vjetroturbina (MW) [4]

¹ Priobalna vjetroturbina (eng. *Offshore windturbine*) naziv je za vjetroatregat koji ima čvrste temelje, ali se gradi u moru, uglavnom u priobalnom području, na udaljenosti do 50 km od obale, i na dubini vode do 60 m.

3. VJETAR

3.1. Vjetropotencijal

Vjetropotencijal predstavlja karakteristike vjetra na pojedinoj lokaciji te je najvažniji čimbenik za izbor položaja vjetroelektrane.

Srednja godišnja brzina vjetra na određenoj visini iznad tla

Brzina vjetra osnovni je čimbenik od kojeg se kreće pri projektiranju svih vjetroatregata koji će se nalaziti na nekoj lokaciji, njihovog broja te prostornog razmještaja. Brzina vjetra također, služi kao polazna točka za sve proračune o ekonomskoj isplativosti i proizvodnji energije. Srednja godišnja brzina vjetra na određenoj visini iznad tla predstavlja najvažniju karakteristiku vjetra. Naime, vjetrogenerator se pokreće kada brzina vjetra poraste iznad otprilike 3 m/s. Pri toj je brzini proizvodnja električne energije vrlo mala, no porastom brzine količina proizvedene električne energije se povećava do maksimuma, što se postiže na brzini vjetra od oko 12 m/s. Daljnjim porastom brzine vjetra, količina proizvedene energije se više ne povećava. Kada brzina vjetra poraste preko 25 do 30 m/s, vjetroatregat se isključuje. Pri takvim brzinama, vjetroatregat ne može podnijeti mehanička opterećenja koja nastaju. Zbog toga je za idealnu proizvodnju električne energije potrebna brzina vjetra od oko 12 m/s.

Raspored brzine vjetra na godišnjoj razini

Za iskorištavanje vjetra nikako nisu povoljne velike oscilacije brzine vjetra tijekom godine. Tako u godišnjem prosjeku može biti sadržan veliki broj sati s brzinom iznad 30 m/s ili ispod 3 m/s što nikako nije dobro. Optimalan vjetar za energetsko iskorištavanje je vjetar do srednje jakosti, bez velikih oscilacija i sa što većom učestalošću. Zbog velike ovisnosti prinosa energije (a samim time i ekonomske isplativosti) o brzini vjetra (ovisnost energije vjetra o kubu brzine vjetra), potrebna su točna mjerenja vjetra na samoj lokaciji. Mjerenja se obavljaju pomoću anemometara pričvršćenih za stupove, približno na visini osi na kojoj bi se trebao nalaziti vjetroatregat. Zadnjih godina bilježi se sve veći broj tzv. udaljenih mjerenja pomoću LIDAR-a (eng. *Light Detection and Ranging*). Mjerenje se obično vrši na nekoliko stupova na lokaciji u periodu od 6 mjeseci do nekoliko godina.

Ruža vjetрова

Za određenu lokaciju bitno je poznavati i smjerove iz kojih puše vjetar da bi se odredio najoptimalniji raspored vjetroatregata zbog maksimalnog iskorištavanja vjetra iz svih smjerova.

Osrednjavanje vjetra

Raspodjela brzine vjetra ili osrednjavanje, predstavlja drugu najvažniju karakteristiku vjetra. Mjerenje brzine kod osrednjavanja vrši se na visini do 10 m, a period mjerenja traje nekoliko godina. Za aproksimaciju prikupljenih podataka koristi se Weibullova funkcija koja omogućuje prikaz vjerojatnosti pojave neke brzine vjetra tijekom nekog vremenskog razdoblja i puno realniju raspodjelu brzine vjetra.

Ostalo

Ostali bitniji podaci o vjetru koji nemaju utjecaj na proizvodnju energije iz vjetra, ali imaju utjecaj pri određivanju opterećenja na lopatice rotora i očekivani vijek trajanja samog vjetroatregata, su dugoročna gustoća zraka na lokaciji i intenzitet turbulencije vjetra na istoj.

3.2. Kinetička energija vjetra

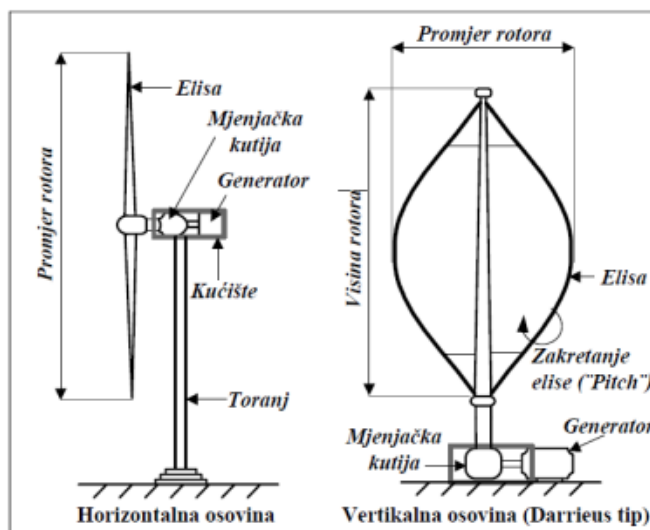
Količina energije koju vjetar prenosi rotoru ovisi o gustoći zraka, površini rotora i brzini vjetra. Kinetička energija tijela ovisi o gustoći zraka tj., što je zrak gušći dobije se više energije na vjetroturbini. Hladniji zrak je gušći od toplijeg, stoga će vjetroatregat, pri istoj brzini vjetra, dati više električne energije tijekom zime nego tijekom ljeta. Površina rotora određuje koliko količinu energije vjetroatregat može dobiti iz vjetra. Pošto se površina rotora povećava s kvadratom promjera rotora, dvostruko veća turbina dat će četiri puta veću količinu energije. Drugi faktor koji utječe na izlaznu snagu vjetroatregata je činjenica da rotor usporava brzinu vjetra, tako da je brzina vjetra ispred rotora manja nego iza rotora, što znači da vjetroatregat nije u mogućnosti iskoristiti svu energiju vjetra. Teoretska izlazna snaga vjetroatregata je veća što je veća brzina vjetra tj. ovisi o trećoj potenciji brzine vjetra. Međutim, efektivna snaga koju daje vjetroatregat ovisi o mnogo faktora, dok u malom rasponu ovisi o brzini vjetra. Maksimalna stupanj učinkovitosti vjetroturbine definiran je Betzovim zakonom prema kojemu se može iskoristiti samo 59 % raspoložive energije vjetra. Realna iskoristivost, zbog gubitaka, kreće se od 35 % do 45 %.

4. KONSTRUKCIJSKI OBLICI VJETROTURBINA

Vjetroelektrana se sastoji od turbine koja pretvara kinetičku energiju vjetra u mehaničku energiju i elektrogeneratora koji mehaničku energiju pretvara u električnu. Sve to postavljeno je na vrhu cilindričnog (ili rešetkastog) stupa.

Konstruktivski oblici vjetroelektrana mogu se razlikovati prema položaju vratila te prema broju lopatica. Prema položaju vratila razlikuju se dvije osnovne vrste vjetroturbina (Slika 7.) [2]:

- vjetroturbine s horizontalnim vratilom rotora
- vjetroturbine s vertikalnim vratilom rotora.



Slika 7. Konstrukcijske izvedbe vjetroturbine s obzirom na položaj vratila [6]

Iako su vjetroturbine s horizontalnim i vertikalnim vratilom rotora konstrukcijski drugačije izvedbe, osnovni mehanizmi za pretvorbu kinetičke energije vjetra u električnu energiju su im isti. Oba se tipa mogu proizvesti s regulacijom položaja elisa naspram vjetra tzv. "*pitch*" regulacija ili sa elisama koje su fiksno učvršćene, odnosno nije ih moguće regulirati tzv. "*stall*" regulacija. Kod "*pitch*" regulacije, mogućnost zakretanja elise oko svoje osi daje veću iskoristivost kinetičke energije vjetra, ali takva izvedba povećava investicijske troškove i sklonija je operativnim kvarovima. Izvedba sa "*stall*" regulacijom, omogućava samostalnu regulaciju vjetroturbine te time manje održavanje, ali zbog toga ima manju mogućnost iskorištavanja kinetičke energije vjetra [2].

4.1. Vjetroturbine s horizontalnim vratilom rotora

Gotovo 95 % instaliranih vjetroagregata na tržištu su oni s horizontalnim vratilom rotora i 3 lopatice. Najčešće su izvedbe sa 3 lopatice, iako mogu biti i sa 2 i jednom. Generatori ovih turbina najčešće se postavljaju na vrh stupa u trup zajedno sa multiplikatorom (uređaj za povećanje brzine vrtnje). Postoje dva načina izvedbe ovih vjetroturbina:

- *UPWIND* rotori (tzv. uz vjetar) gdje se rotor vrti ispred stupa (Slika 8.), ovi tipovi rotora su najuobičajeniji u komercijalnoj primjeni.



Slika 8. Upwind rotor [7]

- *DOWNWIND* rotori (tzv. niz vjetar) gdje se rotor vrti iza stupa (Slika 9.) i periodički prolazi kroz poremećeno strujanje iza stupa stvarajući veliku buku što je veliki nedostatak za njihovu širu upotrebu.



Slika 9. Downwind rotor [7]

Prednosti vjetroturbina s horizontalnom osi vrtnje:

- veća učinkovitost u proizvodnji električne energije
- visoki tornjevi omogućuju pristup većim brzinama vjetra
- veća stabilnost
- mogućnost zakreta lopatica daje veću kontrolu, omogućuje namještanje optimalnog kuta kako bi vjetroatregat iskoristio maksimum energije vjetra,
- mogućnost fiksacije lopatica u oluji što smanjuje mogućnost nastanka štete [8].

Nedostaci vjetroturbina s horizontalnom osi vrtnje:

- većina ih sadrži sustav za zakretanje turbine što povećava troškove
- problematičan rad u vjetrovima na malim nadmorskim visinama koji su često turbulentni
- troškovi transporta za lopatice i toranj su visoki
- problem instalacije zbog potreba za dizalicama [8].

4.1.1. Vjetroturbine s horizontalnim vratilom rotora s obzirom na broj lopatica

Broj lopatica rotora kod horizontalnih vjetroturbina ima veliki utjecaj na njihove karakteristike. Klasični "Danski koncept" predstavlja uobičajenu vjetroturbinu s 3 lopatice. Neparni broj lopatica u odnosu na parni bolje je rješenje jer daje bolju uravnoteženost cijele konstrukcije. Rotor s tri lopatice ima jednoličniju raspodjelu težine po površini zahvata rotora te je dinamički i vizualno ujednačeniji (Slika 10.).

Uštedom na jednoj lopatici, rotor s dvije lopatice (Slika 11.) ima potrebu za većom brzinom vrtnje da bi dobio istu količinu energije kao kod vjetroturbina s tri lopatice. Zbog većih brzina povećava se i razina buke, a osim toga izvedba s dvije lopatice ostavlja dojam kretnje "izvan centra".



Slika 10. Rotor s tri lopatice [9]



Slika 11. Rotor s dvije lopatice [10]

Unatoč još većoj uštedi kod rotora s jednom lopaticom (Slika 12.), ovakva vjetroturbina mora savladati dinamički disbalans jer aerodinamičke sile na lopaticu nisu kompenzirane drugom

lopaticom. Za ovakav se tip vjetroturbine često kaže da ima iritantan utjecaj na krajolik zbog svog izgleda poput "zamašne toljage".

Vjetroturbina s većim brojem lopatica (Slika 13.) tzv. "Američka vjetroturbina", koristi se na farmama za pogon pumpi za vodu. Osim što ima malu brzinu vrtnje ima i malu ukupnu učinkovitost, a izvedba joj je jednostavna i robusna.



Slika 12. Rotor s jednom lopaticom [11]



Slika 13. Američka "farmerska" vjetrenjača [12]

4.2. Vjetroturbine s vertikalnim vrtilom rotora

Kod ovih turbina os vrtnje postavljena je vertikalno zbog čega se generator nalazi u podnožju što smanjuje opterećenje tornja. Glavna prednost ove konstrukcije je da turbina ne treba biti usmjerena direktno u vjetar da bi bila učinkovita. Moderne vjetroelektrane s vertikalnim vrtilom rotora zasnivaju se na idejnim rješenjima francuskog inženjera Darrieus-a, po kojem su i dobile ime. Darrieus-ove vjetroturbine mogu biti izvedene na nekoliko način. Najuočajeniji tip je tzv. Eggbeater turbina (Slika 14.) izrađene s dvije ili tri lopatice s dobrom iskoristivošću, ali slabijom pouzdanošću. Jedna od izvedbi Darrieus-ove vjetroturbine je H-tip kod kojeg su lopatice postavljene paralelno s obzirom na os vrtnje. Ova je izvedba jednostavnija, ali zahtjeva veću čvrstoću lopatica. Osim vertikalnih izvedbi, postoje i horizontalne izvedbe Darrieus-ove vjetroturbine (Slika 15.), čime se proširuje spektar njihove primjene.



Slika 14. Darrieus-ov vjetroagregat [13]

Prednosti vjetroturbina s vertikalnim vrtilom rotora:

- lakše održavanje zbog položaja rotacijskih dijelova bliže tlu
- nije potreban mehanizam za zakretanje što pojeftinjuje izvedbu
- pogodne za korištenje na mjestima gdje je brzina vjetra blizu tla visoka
- nema potrebe za visokim tornjem što također pojeftinjuje izvedbu

- ne moraju se okretati prema smjeru puhanja vjetra, što ih čini povoljnima u uvjetima turbulentnog vjetra [8].

Nedostaci vjetroturbina s vertikalnim vrtilom rotora:

- većina ovih turbina ima iskoristivost u rangu 50 % iskoristivosti turbina s horizontalnom osi vrtnje
- većina ih mora biti postavljena na relativno ravan dio tla što smanjuje mogućnosti instalacija na brojnim lokacijama
- većina ih ima mali zakretni moment pa je potreban vanjski izvor energije prilikom pokretanja,
- pošto je većina dijelova smještena na tlu, oni su opterećeni velikom težinom strukture iznad njih što u slučaju nedovoljno dobrog dizajna znatno otežava izmjenu dijelova [8].



Slika 15. Horizontalna izvedba Darrieus-ove vjetroturbine [14]

5. GLAVNI DIJELOVI VJETROTURBINE

Osnovni konstrukcijski dijelovi vjetroelektrane s horizontalnim vrtilom, neovisno o veličini instalirane snage, su manje-više isti. Vjetroelektrane male instalirane snage većinom su zakrenute niz vjetar, tako da imaju "vertikalni stabilizator" koji ih zakreće.

5.1. Rotor

Rotor vjetroatagregata se sastoji od lopatica i glave rotora. Ovisno o tome kako reguliramo snagu rotor može biti izveden na dva načina:

- regulacija napadnog kuta tijekom rada vrši se zakretanjem lopatica tako da se profil lopatice namješta u optimalni položaj (*eng. pitch*)
- regulacija snage vjetroturbine vrši se korištenjem aerodinamičkog efekta poremećenog trokuta brzina (*eng. stall*), odnosno promjenom brzine vjetra mijenja se, na aeroprofilu, napadni kut struje zraka [15].

5.2. Lopatice rotora

Konstrukcija lopatice pojedinog rotora određena je korištenim aerodinamičkim profilom, vanjskom geometrijom i korištenim materijalima. U današnje vrijeme, lopatice su oblikovane poput krila zrakoplova, a pokreće ih aerodinamički uzgon te imaju vrlo visok stupanj pretvorbe kinetičke energije vjetra u mehanički rad. Izvedba s tri lopatice je uobičajena za gotovo sve velike proizvođače vjetroatagregata [15].

Profili brzohodnih turbina su pretežno lamelirani s poliestrom ojačanim staklenim vlaknima (GFRP), ili vrijeme plastikom ojačanom karbonskim vlaknima (CFRP). Iako je CFRP skuplji, njegova zamorna čvrstoća je tri puta veća zbog čega su idealni za lake konstrukcije. Izrada lopatice od metala tipična je za Darrieus-ove turbine jer, za neuvijenu lopaticu konstantne širine, aluminijski ekstrudirani profil omogućuje jeftiniju proizvodnju. Manje turbine povremeno koriste drvene kompozite napravljene od slojeva furnira lameliranog sa smolom i zabrtvljene GFRP premazom. Aerodinamička svojstva i optimizacija konstrukcije rotorske lopatice rezultira kompleksnom geometrijom lopatice sa sferično zakrivljenim površinama čija geometrija teško može biti jeftino izrađena bez uporabe tehnologije kompozita [16].

5.3. Stup i temelj vjetroatregata

Visina stupa važna je za ostvarenu snagu turbine, a samim time i za ekonomsku učinkovitost. S obzirom na struktura stupa, razlikujemo elastičnu i krutu konstrukciju. Kod elastične konstrukcije, uzbudna frekvencija niža je od vlastitih torzijskih i fleksijskih frekvencija stupa, dok je kod krute konstrukcije uzbudna frekvencija veća od prve vlastite frekvencije stupa.

Stup može biti izveden kao cjevasto konični, teleskopski, rešetkasti, učvršćeni i povezani. Danas se najčešće koristi cjevasta konstrukcija, a osim visoke čvrstoće karakterizira ju i veća otpornost na vibracije. Prednost rešetkaste konstrukcije nalazi se u jednostavnosti, a budući da ju je moguće rastaviti na manje dijelove, prikladnija je za prijevoz i ugradnju. Unutar cjevastog stupa se nalaze stube ili ljestve, a kod većih agregata se ponekad ugrađuje i dizalo. U podnožju se nalazi transformator koji povezuje vjetroatregat sa srednjenaponskom mrežom, te kontrolna i mjerna jedinica. Transformator se može nalaziti i u zasebnoj građevini [15].

Cjevasti stupovi su uglavnom napravljeni od čelika. Neki proizvođači koriste betonske stupove napravljene centrifugalnim procesom kako bi snizili cijenu. No uslijed znatno veće težine, mogu se povećati cijene transporta i montaže. Zbog toga postoji konstrukcija izrađena od rešetkastih cjevastih betonskih sekcija. Male i srednje turbine uglavnom imaju krute stupove, dok velike koriste meke konstrukcije kako bi uštedjele materijal.

Materijali koji se najčešće koriste kod izrade stupova imaju čvrstoću 350-420 MPa, dok im je žilavost 47 J na - 40 °C za *onshore* vjetroatregate, i 40 J na -50 °C za *offshore* vjetroatregate. Debljina materijala je 50 mm u podnožju do 8 mm na vrhu za *onshore* vjetroatregate, dok je za *offshore* vjetroatregate 80 mm u podnožju te do 10 mm na vrhu.

Zavarivanje stupova zahtjeva dobro razrađen proizvodni proces. Kvalitetno planiranje je pola učinjenog posla, a kvalitetna priprema druga polovica. Samom tehnologijom zavarivanja možemo ubrzati proces proizvodnje i na taj način uštedjeti veliku količinu novca.

5.4. Kočioni sustav

Kada električni generator ispadne iz mreže, odnosno kada brzina naleta vjetra prijeđe maksimalnu vrijednost (primjerice 25 m/s) dolazi do izrazitog dinamičkog opterećenja. Zbog

toga mora postojati kočioni sustav kako bi rasteretio prijenosnike snage, odnosno zaustavio rotor. Također, zadatak ovog sustava je da održi projektnu brzinu vrtnje konstantnom, tj. da osigura sustav čije je djelovanje dinamički uravnoteženo.

Najčešća izvedba kočionog sustava je disk kočnica. Djelovanje joj može biti elektromagnetsko ili hidrauličko, a aktiviraju se signalom generatora ili uređaja kojim se mjeri brzina vrtnje generatora. Broj okretaja rotora se regulira aerodinamičkim kočenjem. Takvo kočenje ostvaruje se odabirom odgovarajućeg kuta lopatica s obzirom na vjetar [16].

5.5. Električni generator

Turbinski dio vjetroatregata s rotorom, kočnicama i prijenosnikom snage predstavlja važan dio cjelokupnog sustava čija je osnovna funkcija pogon električnog generatora. Osim nekih tehničkih zahtjeva kao što su, veliki stupanj iskoristivosti, izdržljivost, dugotrajnost, uzimajući u obzir uvjete povećane vlažnosti, slanosti, otpornosti na krute čestice, povišenu temperaturu i sl., pred generator se postavlja zahtjev pouzdanosti sa što je moguće manje održavanja.

Prema vrsti električne struje razlikujemo istosmjerni i izmjenični generator. Istosmjerni generatori se, zbog problema pouzdanosti, rijetko primjenjuju [15]. Kod vjetroelektrana predviđenih za komercijalnu upotrebu, ugrađuju se izmjenični generatori koji mogu biti sinkroni i asinkroni. Zbog jednostavnosti i jeftinije izvedbe, često se koriste asinkroni generatori.

5.6. Zakretnik

Orijentacija rotora prema vjetru bila je komplicirano pitanje već kod povijesnih turbina. Uređaji s vertikalnom osi, najstarije konstrukcije vjetroturbina, ne trebaju taj mehanizam. Ta prednost ima i svoje nedostatke. U osnovi to načelo radi samo zato što struja zraka koja rezultira iz samorotacije daje lopaticama jasan smjer puhanja. Kada je rotor zaustavljen, pogonsko načelo ne funkcionira. Zbog toga vjetroturbine s vertikalnom osi nisu samorotirajuće, već trebaju biti pokrenute do svoje radne rotacijske brzine. Uređaji s horizontalnom osi vrtnje orijentiraju svoje rotore prema vjetru pasivno slobodnim skretanjem ili vjetrokazima ili aktivno koristeći ventilatore ili skretne pogone. Pasivni zakretači moraju

biti konstruirani na način da gondola ne slijedi naglu promjenu smjera vjetra s prebrzim zakretnim gibanjem. Sustavi pasivnog zakretanja su zbog toga korišteni samo kod turbina s promjerom rotora do 10 m. Za veće turbine, ispravno konstruiran vjetrokaz bio bi prevelik da bi bio ekonomski isplativ.

Aktivni sustavi koji mogu biti primijenjeni i kod *upwind* i kod *downwind* turbina, koriste pogon za rotiranje gondole u odnosu na stup. Taj pogon može bit rozeta (rozeta je bila prva turbina koja je olakšavala mučan mlinarski posao okretanja rotora prema promjenjivom vjetru pomoću velike grede za zakretanje) spojena okomito na vjetar.

Većinom su električni i hidraulički zakretni pogoni korišteni za orijentiranje rotora prema vjetru. Zakretni pogon pokretan je malim vjetrokazom i prenosi okretni moment kroz paralelne zupčanike vratila na veliki prsten na stupu. Konstrukcija stupa mora uzeti u obzir da će aktivni sustavi zakretanja izazvati torzijske vibracije stupa koje će se prenijeti na gondolu uslijed sprege stupa i gondole [15,16].

5.7. Gondola ili kućište vjetroturbine

Kućište stroja, gondola ili kabina s jedne strane štiti generatorski sustav od okolišnih utjecaja, a s druge štiti okoliš od buke dotičnog sustava. Kabina se nalazi na vrhu stupa. Njezini najbitniji dijelovi za jedan opći vjetroatregat, uz određene specifičnosti ovisno o proizvođaču i modelu su: kućište, elementi za uležištenje sporohodnog vratila, zupčanički prijenosnik, brzohodno vratilo s disk kočnicom, generator, kontrolna jedinica, rashladni sustav, motorni pogon za zakretanje kabine s kočnicom i hidraulički pogon. Zupčanički prijenosnik povećava brzinu vrtnje prijenosnim omjerom od 30 do 60 puta. Iz njega izlazi brzohodno vratilo koje pokreće generator. Kod nekih tipova vjetroatregata generator je direktno spojen na rotor bez prijenosnika. Elektronički kontrolni sustav uz pomoć podataka s kontrolne jedinice (koja mjeri podatke o brzini i smjeru vjetra) prati uvjete rada vjetroatregata [15].

6. VRSTE VJETROELEKTRANA

6.1. Vrste vjetroelektrana prema instaliranoj snazi

Prema instaliranoj snazi, odnosno proizvodnosti, vjetroelektrane je moguće podijeliti na male vjetroelektrane i crpne stanice instalirane snage do nekoliko desetaka kW te velike vjetroelektrane pojedinačne snage do 3,5 MW (Slika 16.) [2].



Slika 16. Podjela vjetroelektrana prema instaliranoj snazi [2]

6.1.1. Male vjetroelektrane

Male su vjetroelektrane većinom izvedene od vjetroturbina s horizontalnim vrtilom rotora i tri lopatice, koje imaju tzv. *stall* regulaciju, odnosno postavljene su niz vjetar. Električni generatori malih vjetroelektrana mogu biti istosmjerni ili izmjenični i to izvedeni isključivo kao asinkroni [2]. Male elektrane koriste se:

- kao dodatni izvori energije, uz primarno napajanje iz električne mreže (*grid connected*) gdje višak energije predaju u elektroenergetsku mrežu
- kao autonomni izvor, kada je potrošač daleko od komercijalnog elektroenergetskog sustava ili bez mogućnosti povezivanja na mrežu (*off-grid*)
- za pogon vodenih crpki ili za punjenje akumulatora na brodicama [2].

6.1.2. Velike vjetroelektrane

Velike vjetroelektrane služe za komercijalnu proizvodnju električne energije. Donja granica brzine vjetra pri kojoj se gradnja vjetroelektrane isplati je oko 4,5 m/s. Međutim, velike se vjetroelektrane najčešće grade na području gdje je brzina vjetra 6 m/s i više. Velike vjetroelektrane najčešće se sastoje od niza blisko složenih velikih vjetrogeneratora, najčešće istog tipa, izloženih istoj struji vjetra i priključenih na zajedničko rasklopno postrojenje na mrežu, a nazivaju se vjetroparkovi. Raspored vjetroatregata mora biti takav da svaki od njih maksimalno iskorištava energiju vjetra, a da rad jednog ne ometa rad i efikasnost ostalih vjetroatregata. Izlazna snaga vjetroatregata kod velikih vjetroelektrana je najčešće od 500 kW do 5 MW, a promjeri rotora su reda veličine od 39 do 150 m. Velike vjetroelektrane mogu se graditi na kopnu (*onshore*) ili na morskoj pučini (*offshore*) [2].

6.2. Vrste vjetroelektrana s obzirom na položaj

S obzirom na položaj razlikujemo kopnene vjetroelektrane, priobalne vjetroelektrane, plutajuće vjetroelektrane i zračne vjetroelektrane.

6.2.1. Kopnene vjetroelektrane

Kopnene vjetroelektrane grade se na čvrstom tlu i najčešći su oblik vjetroelektrana. Trenutno najveća kopnena vjetroelektrana na svijetu je Gansu vjetropark u Kini (Slika 17.), čiji je cilj postići 20.000 MW instalirane snage do 2020. godine.



Slika 17. Gansu vjetropark u Kini, najveća kopnena vjetroelektrana na svijetu [17]

6.2.2. Offshore vjetroelektrane

Vodena površina ima povoljan koeficijent hrapavosti i stalno strujanje jačih vjetrova, te je zbog toga vjetropotencijal vodenih, prvenstveno morskih, površina mnogo veći od onog na kopnu. Povećanje prosječne brzine vjetra od 10 % rezultirat će porastom proizvodnje električne energije do 30 %. Najveći nedostatak *offshore* vjetroelektrana su visoki investicijski troškovi, što se u prvom redu odnosi na izradu stupa vjetroatregata.

Zbog bolje učinkovitosti, vjetroatregati *offshore* vjetroelektrana su međusobno udaljeni i do 10 dijametara rotora, za razliku od onih na kopnu koji su udaljeni 2-4 dijametra rotora. Budući da je energija vjetra ključna u budućoj opskrbi električnom energijom, zaštita od korozije *offshore* vjetroelektrana je područje u izrazitom razvoju. Sustav zaštite mora osigurati izdržive premaze i štititi vjetroatregat od vlage i saliniteta, premazi moraju reflektirati UV zrake, moraju štiti od smrzavanja i sve to za čitavo vrijeme eksploatacije u periodu od 20-ak godina. *Offshore* vjetroelektrane mogu se podijeliti na priobalne, plutajuće i zračne vjetroelektrane [2].

6.2.2.1. Priobalne vjetroelektrane

Priobalna vjetroelektrana (eng. *Offshore wind park*) je vrsta vjetroelektrane s čvrstim temeljima koja se gradi na moru, uglavnom u priobalnom području, gdje je dubina vode obično manja od 60 metara, a udaljenost od obale do najviše 50 kilometara. Činjenica da voda (a posebice duboka voda) ima manju površinsku "hrapavost" od kopna jako utječe na brzine vjetra, koje su mnogo veće na moru, a samim time i faktori snage ovih instalacija su znatno veći. Zbog viših tornjeva, kada se uračuna dio ispod vode, sama izgradnja morskih instalacija vjetroatregata je skuplja od kopnenih. Proizvedena električna energija se do kopna prenosi putem podmorskog kanala. I održavanje je također skuplje jer se mora obratiti znatno veća pažnja zaštiti od korozije zbog čega se često dodaju dodatni premazi i katodna zaštita. *The London Array* (Slika 18.) je trenutno najveći *offshore* vjetropark na svijetu sa instaliranom snagom od 630 MW [8].



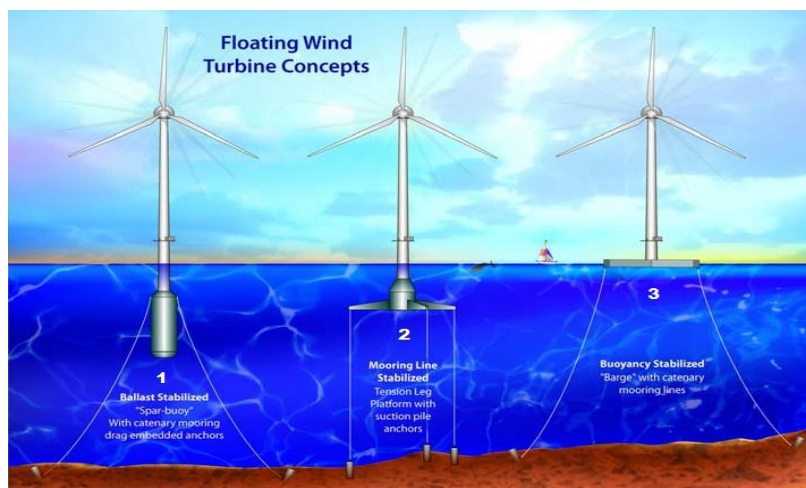
Slika 18. The London Array, najveća *offshore* vjetroelektrana na svijetu [18]

6.2.2.2. Plutajuće vjetroelektrane

Plutajuća ili pučinska vjetroelektrana je vrsta vjetroelektrane koja se postavlja na plutajuću strukturu u dubljem moru, tamo gdje nije moguće postaviti priobalnu vjetroelektranu. Zbog gradnje daleko na pučini, ove vjetroelektrane se još nazivaju i "*Deep water wind turbines*" (Slika 19.). Ove vjetroelektrane su složene i zahtijevaju veće investicijske troškove, ali nove studije pokazuju da zbog njihovih mogućnosti pristupa snažnijim vjetrovima na udaljenijem moru imaju veću isplativost primjene.

Različita konstrukcijska rješenja ovih vjetroelektrana znatno će utjecati na odnos trošak-profit. Plutajuće vjetroelektrane dijele se na:

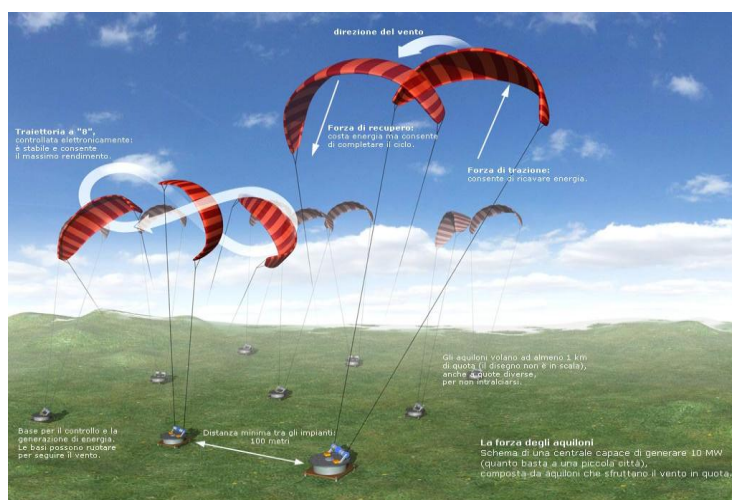
- Balastne plutajuće vjetroelektrane (eng. *Ballast Stabilized*) koje stabilnost ostvaruju koristeći balastnu težinu spremnika uronjenog u vodu, na način da onemogućava zakretanje stupa u bilo kojem smjeru,
- Privezne plutajuće vjetroelektrane (eng. *Mooring Line Stabilized*) koje sadrže platforme čija se stabilnost postiže koristeći napetost priveznih sajli.
- Plovne plutajuće vjetroelektrane (eng. *Bouyancy Stabilized*) koje stabilnost ostvaruju koristeći veliku plutajuću površinu koja uz djelovanje uzgona održava agregat u najpovoljnijem položaju [20].



Slika 19. Prikaz koncepta lutajućih vjetroagregata [2]

6.2.2.3. Zračne vjetroelektrane

Koncept visinskih vjetroelektrana se zasniva na iskorištenju energije vjetra u višim slojevima atmosfere. One predstavljaju dizajnerski koncept vjetroelektrana koju su na različite načine podignute u visinu bez potpore tornja (Slika 20.). Tijekom posljednjih 20 godina napravljeno je nekoliko desetaka projekata i koncepata od kojih se istaknula nekolicina s mogućnošću realizacije. Prednost im je mogućnost montaže na bilo kojoj lokaciji na svijetu te iskorištavanje vjetra na visinama većim od vjetroelektrana montiranih na tlu. Visinske vjetroelektrane na taj način mogu proizvoditi električnu energiju 90 % vremena (one na kopnu maksimalno 35 % vremena). Sve to rezultiralo bi pojeftinjenjem električne energije i zahtijevalo bi manje vjetroelektrana za istu količinu električne energije [8].



Slika 20. Koncept visinskih zračnih agregata, Kite Gen [19]

7. ZAŠTITA PREMAZIMA

S obzirom da su konstrukcijski materijali skloni nenamjernim, ali štetnim promjenama, koje s vremenom smanjuju njihovu uporabnu vrijednost, takva oštećenja se nastoje usporiti ili spriječiti mjerama zaštite materijala. Taj proces zaštite uobičajeno zovemo površinska zaštita s obzirom da uglavnom sva oštećenja materijala počinju na njihovoj površini. Vrlo često, pravilno projektirana i izvedena zaštita od korozije premazima², ima presudnu ulogu za radni vijek konstrukcije zbog čega ona mora biti dugotrajna i pouzdana.

Naravno, osim zaštite prevlačenjem, postoje i druge osnovne metode za zaštitu od korozije:

- konstrukcijsko-tehnološke mjere
- primjena korozijski postojećih materijala
- elektrokemijska zaštita
- zaštita inhibitorima korozije
- zaštita prevlačenjem.

Od samog konstruiranja pa sve do izrade pojedinih dijelova ili proizvoda potrebno je birati tehnološke procese koji daju što homogeniju strukturu i teksturu te što bolje obrađenu površinu samog materijala. Također, i pozicioniranje opreme mora imati važnu ulogu te mora biti odrađeno u svrhu što povoljnijih klimatskih uvjeta kojima je oprema izložena. Pri izboru materijala, kao najvažnijem ali i najsloženijem zadatku konstruktora, potrebno je u obzir uzeti brojne ekonomske i tehničke kriterije. Danas su najčešći izbor korozijski postojeći materijali poput nehrđajućih čelika ili aluminija koji se danas koriste u svim aspektima života, od industrije do svakodnevne primjene. Ove dvije metode prvenstveno su bitne prije samog odabira sustava zaštite. Kao sustav zaštite ukopanih i uronjenih konstrukcija, na kojima je teže održavati sustav zaštite premazima, koristi se elektrokemijska zaštita koja može biti katodna i anodna. Osim elektrokemijske zaštite, korozijsko djelovanje agresivnih iona u elektrolitu vrlo se često smanjuje primjenom inhibitora korozije koji se definiraju kao tvari anorganskog ili organskog podrijetla koje u vrlo malim koncentracijama smanjuju brzinu korozije do tehnološki prihvatljivih vrijednosti (0,1 mm/god). Inhibitori se primjenjuju tamo gdje se druge

² Premazima nazivamo jedan ili više međusobno povezanih slojeva na nekoj podlozi koji stvaraju "suhi" film.

metode zaštite od korozije ne pokazuju uspješnima. Također, svoju su primjenu pronašli i u vodorazrjedivim premazima gdje štite površinu sve dok voda pri sušenju ne ispari iz premaza (naime, primjena vode kao otapala u boji može uzrokovati koroziju metalne površine) [23]. Zaštita prevlakama služi kao granica prema agresivnom mediju. Prevlake mogu biti metalne i nemetalne, dok nemetalne mogu biti anorganske i organske. U primjeni zaštite čeličnih konstrukcija, najveću ulogu imaju nemetalne organske prevlake. Postupci nanošenja metalnih prevlaka su metalizacija i platiniranje, a na podlogu se nanose fizikalnim ili kemijskim putem, ovisno o tome da li se prevlačenjem događaju samo fizikalne promjene ili su prevlake produkt kemijskih reakcija [20]. Zaštita nemetalnim anorganskim prevlakama nanosi se fizikalnim postupcima, bez sudjelovanja podloge (prevlake emajla, betona) i kemijskim postupcima, sa sudjelovanjem podloge, gdje se površinski sloj metala mijenja u novi sloj jednog ili više oksida koji ima bolja antikorozivna svojstva [20]. Organske prevlake bit će detaljnije razmatrane u Poglavlju 7.1.

7.1. Zaštita organskim prevlakama

Čak se 3/4 metalnih površina štiti organskim prevlakama, a neke se površine moraju štititi isključivo njima. Sve prevlake koje organska tvar, tvorbom opne, čini kompaktnima, nazivamo organskim prevlakama. Takvi slojevi se dobivaju bojanjem i lakiranjem, podmazivanjem, plastifikacijom, gumiranjem i bitumenizacijom [20].

7.1.1. Klasifikacija premaza

Premazna sredstva se mogu podijeliti prema:

- sastavu
- osnovnoj namjeni (zaštita od korozije, zaštita od mehaničkog oštećivanja, zaštita od požara, zaštita od biološkog obraštanja, sredstva za dekoraciju itd.)
- izgledu (obojeni, bezbojni, sjajni, mutni)
- podlogama na koje se nanose (beton, obojeni i crni metali, drvo, itd.)
- broju sastojaka koji se miješaju prije nanošenja (jednokomponentna, dvokomponentna, višekomponentna)
- mehanizmu sušenja (fizikalno i kemijsko)
- ulozi u premaznom sredstvu (temeljna, međuslojna, pokrivna premazna sredstva, kitovi, itd.).

7.1.2. Komponente premaza

Svaki premaz čine vezivo, otapalo/razrjeđivač, pigmenti i punila te aditivi.

7.1.2.1. Vezivo

Vezivo čini opnu prevlake, a kao organske tvari u tekućem ili praškastom stanju, povezuju sve komponente premaznog sredstva te nakon nanošenja stvaraju tvrdi zaštitni sloj. Od brojnih veziva, važno je istaknuti ona na bazi sušivih masnih ulja, poliplasta, derivata celuloze, prirodnih smola, prirodnog ili sintetičkog kaučuka i bituminoznih tvari. U primjeni za zaštitu *onshore* i *offshore* vjetroelektrana, kao veziva, se najčešće koriste epoksidne smole, poliuretani, etilsilikati te klorkaučuk [20]. Detaljniji prikaz kemijskih i fizikalnih svojstava najučestalijih veziva prikazan je u Tablici 1.

Epoksidne smole

Na osnovi epoksidnih smola proizvode se jednokomponentna premazna sredstva koja se peku (neka od njih su vodorazrjeđiva) i dvokomponentna premazna sredstva koja otvrdnjavaju katalitički ili pečenjem. Epoksidni premazi su uglavnom dvokomponentni gdje je glavni sastojak prve komponente epoksidna smola (koja može sadržavati pigmente, punila, otapala i aditive), dok je glavni sastojak druge komponente otvrdnjivač-polimer koji, preko epoksidne ili hidroksilne skupine, otvrdnjuje s epoksidnim smolama [20].

Poliuretani

I premazna sredstva na bazi poliuretana mogu biti jednokomponentna (otvrdnjuju pomoću vlage u zraku, pečenjem na temperaturu $> 85^{\circ}\text{C}$ ili su veziva modificirana sušivim uljima i alkidima, odnosno katranskom smolom) ili dvokomponentna. Dvokomponentna sredstva od izocijanatnog ili poliesterskog dijela daju najkvalitetnije prevlake lijepog izgleda, postojanih nijansi i sjaja na suncu te otporne na abraziju i temperature do 170°C [20].

Etilsilikati

To su anorganska veziva koja film stvaraju otvrdnjavanjem uz prisutnost vlage u zraku, a najčešće se kombiniraju s cinkom u cinksilikatnim premazima. Podnose visoke temperature zavarivanja i rezanja, postojani su u medijima s pH-područjem od 6 do 9, iznimno otporni na atmosferilije i organska otapala te imaju visoku tvrdoću i temperaturnu otpornost do $+400^{\circ}\text{C}$. Koriste se za zaštitu spremnika za kemikalije te radioničku zaštitu [20].

Klorkaučuk

Proizvodi se od prirodnog ili sintetskog kaučuka, a konačni proizvod sadrži 65-68 % klora. Uglavnom se koristi u premazima koji se suše na zraku, ali je moguća i primjena u premazima koji se suše na visokim temperaturama (max. 120 °C). Premazi na bazi klorkaučuka izuzetno su otporni na mineralna ulja, jake i slabe kiseline i alkalije kao i na vodene otopine soli, dok pod utjecajem biljnih i životinjskih masti mekšaju, a pri temperaturi od 135 °C se raspadaju. Primjena im je prvenstveno u graditeljstvu, horizontalnoj signalizaciji i brodskim bojama te bojama u kemijskoj industriji [20].

U Tablici 1. veziva su, s obzirom na postojanost i otpornost prema pojedinim kemijskim i fizikalnim faktorima, rangirana s visokom (+), srednjom (\pm) te malom (-) otpornošću i pouzdanošću.

Tablica 1. Fizikalna i kemijska svojstva najučestalijih veziva u premazima [20]

Vezivo	Svojstva							
						Kemijska postojanost		
	Postojanost nijanse i sjaja u atmosferijama	Mehanička postojanost	Toplinska postojanost	Otpornost na vodu	Otpornost na sol za otapanje leda	na kiseline	na lužine	na pare otapala
alkid	\pm	\pm	-	\pm	-	\pm	-	\pm
epoksidester	\pm	\pm	\pm	\pm	\pm	-	-	\pm
uretanalkid	\pm	\pm	\pm	\pm	-	\pm	\pm	\pm
poliakrilat	+	\pm	-	\pm	-	-	-	-
polivinil	\pm	\pm	-	+	-	+	+	-
klorkaučuk	\pm	\pm	-	+	+	+	+	-
silikon	+	\pm	+	+	-	-	-	-
silikat	\pm	+	+	+	+	-	-	+
2K-epoksid	-	+	\pm	+	+	\pm	+	+
2K-poliuretan	+	+	+	+	+	+	\pm	+
1K-poliuretan FH	\pm	+	+	+	+	+	\pm	+
2K-katran/epoksid	-	+	\pm	+	+	+	+	-
1K-katran/poliuretan FH	-	+	\pm	+	+	+	+	-

FH- veziva koja otvrdnjuju pomoću vlage iz zraka

2K- dvokomponentna veziva

1K-jednokomponentna veziva

7.1.2.2. Otapalo

Otapala su hlapivi organski spojevi u kojima se vezivo otapa, ali pri tome ne dolazi do kemijskih promjena. Koriste se za postizanje određene viskoznosti premaza kako bi se ona mogla lakše nanijeti na površinu. Najčešće se koriste niskoviskozne i lako hlapive smjese na bazi alifatskih, aromatskih i kloriranih ugljikovodika, ketona, estera i alkohola. Ti se organski spojevi koriste i kao razrjeđivači u pogledu snižavanja viskoznosti premaznih sredstava.

Razlika između otapala i razrjeđivača je ta što se otapalo dodaje u boju pri proizvodnji, dok se razrjeđivač dodaje neposredno prije nanošenja po potrebi [20]. S obzirom da pri hlapljenju, otapala ispuštaju pare štetne za zdravlje ljudi, a koje su pri tome vrlo zapaljive i eksplozivne, postoji tendencija da se otapala sve više zamjenjuju vodom.

7.1.2.3. Pigmenti

Pigmenti su organske ili anorganske netopljive čestice u obliku praha, paste ili vlakana koje mogu biti obojene ili neobojene. Obično se već u proizvodnji raspršuju u premaznom sredstvu. Njima se postiže prozirnost, odnosno obojanost naličja, a poboljšavaju i zaštitno djelovanje, otpornost na svjetlo i grijanje te mehanička svojstva samih premaza [20].

Pigmenti mogu imati nekoliko funkcija: dekorativnu (za pokrivne premaze), antikorozijsku te pigmenti s objema funkcijama. S obzirom na mehanizam zaštitnog djelovanja mogu biti: aktivni (temeljni premaz) i inertni (u svim premazima- zasniva se na barijernom učinku) [20]. Najznačajniji pigmenti i njihova svojstva dana su u Tablici 2.

Tablica 2. Svojstva najznačajnijih pigmenata [20]

Pigment	Sastav	Mehanizam djelovanja	Primjena
olovni minij (crveni minij)	PbO ₄	pasivira željezo	temeljni premaz u zaštiti željeza
olovni sulfat	PbSO ₄	inhibitorsko i neutralizirajuće djelovanje	zbog otpornosti prema vodi upotrebljava se za podvodne konstrukcije
titanov dioksid	TiO ₂	inertni pigment	bijeli pigment, inertan prema kemijskim i atmosferskim utjecajima
silicijev karbid	SiC	inertni pigment	zaštita predmeta u kiselinama i dimnim plinovima

Tablica 2. (nastavak)

crni pigmenti	ugljen, čađa, grafit	inertni pigment	kao pigment za toplotalne boje
bazični olovni karbonat (olovno bjelilo)	PbCO_3 , Pb(OH)_2	djeluje neutralizacijom kiselih tvari, taloženjem korozivnih aniona u obliku olovnih soli	zbog slabog bubrenja primjenu su pronašli u premazima izloženim vlažnoj atmosferi
olovni kromat	PbCrO_4	pasivira željezo	dodaje se temeljnom premazu
olovna gledi	PbO	djeluje neutralizacijom kiselih tvari, taloženjem korozivnih aniona u obliku olovnih soli	upotrebljava se kao dekorativni pokrivni pigment jer ima slaba zaštitna svojstva
olovni suboksid	PbO_2	pasivira željezo	za temeljni premaz
cinkovi kromati	ZnCrO_4	pasivira željezo, aluminij i magnezij	postupno zamjenjuju olovni minij
cinkovo bjelilo	ZnO	neutralizirajuće djelovanje	štiti vezivo od razaranja apsorbirajući UV svjetlo
cink u prahu	Zn	štiti čeličnu površinu katodno	dodaje se temeljnom premazu
željezov oksid	Fe_2O_3	štiti površinu barijerno	primjena u temeljnom premazu za zaštitu predmeta u atmosferi, morskoj vodi i kemijskoj industriji

7.1.2.4. Punila

Anorganske tvari, bijele ili slabo obojane, netopljive u primijenjenom mediju nazivaju se punilima. Njihovim dodavanjem u premaze poboljšavaju se mehanička svojstva, mazivost i svojstva tečenja, smanjuje se ili povećava sjaj, poboljšavaju se barijerna svojstva filma (povećava se otpornost filma prema difuziji vode i agresivnim plinovima). Prema kemijskom sastavu dijele se na sulfite, karbonate, okside i silikate, a dobivaju se iz prirodnih minerala ili sintetskim taloženjem iz vodenih otopina [20].

7.1.2.5. Aditivi

Za postizanje specifičnih svojstava ili kako bi se spriječili njihovi nedostaci, premazima se dodaju aditivi, koji unatoč malom udjelu imaju značajan utjecaj na svojstva. Aditivi mogu biti: disperzanti i okvašivači, reološki aditivi, aditivi protiv pjenjenja, katalizatori i sušila, svjetlosni stabilizatori, korozijski inhibitori, aditivi za poboljšanje izgleda površine.

7.1.3. Sustav premaza

Prema Tablici 3., višeslojni sustav premaza dijeli se na temeljni premaz, međupremaze te završni premaz.

Tablica 3. Peteroslojni sustav premaza [20]

završni premaz	➤ zaštita inertnim dekorativnim pigmentima; niski omjer pigment/vezivo ➤ primarna barijera prema okolišu
međupremazi	➤ visoka otpornost prema kemikalijama i okolišu; osigurava potrebnu debljinu sustava ➤ zaštita inertnim pigmentima; visok omjer pigment/vezivo
temeljni premaz	➤ zaštita aktivnim pigmentima; jako prijanjajući sloj
čelik	

Temeljni premazi osiguravaju dobru prionjivost na podlogu i zaštitu od korozije, a nanose se izravno na metale. Zaštita se ostvaruje aktivno i pasivno. Aktivan način zaštite postiže se kočenjem ionizacije metala podloge (inhibicija, neutralizacija agresivnih sastojaka medija ili katodna zaštita), dok se pasivni način zaštite postiže filmom koji odvaja metal od korozivnog medija. Aktivna zaštita metala temeljnim premazima zasniva se na djelovanju pigmenata koji čine uglavnom preko 80 % masenog udjela premaza. Najvažnije značajke temeljnog premaza su: prionjivost (jaka veza s podlogom), kohezija (velika čvrstoća sloja), inertnost (korozijska otpornost i otpornost na kemikalije), jaka veza s međupremazom te elastičnost [20].

Međupremaz povećava debljinu filma i poboljšava zaštitni učinak sustava, a predstavlja vezu između temeljnog i završnog premaza. Listićavi pigmenti, posloženi paralelno s površinom, osiguravaju zaštitno svojstvo na način da otežavaju prodor vlage i kisika do podloge. Također, cilj im je osigurati povećani električni otpor i jaku koheziju [20].

Zahtjeve u pogledu nijanse boje, sjaja, lakoće čišćenja otpornosti na abraziju, a da pritom štite prethodne slojeve premaza od utjecaja okoline, ispunjavaju završni premazi. Završni premazi su nešto manje debljine od međupremaza, ali zbog visokog udjela veziva imaju veću gustoću i

tvore čvrsti sloj. Njihov zadatak je i da sprječavaju obraštanje podvodnih dijelova konstrukcija, širenje požara ili onemogućavaju klizanje [20].

7.1.4. Mehanizmi zaštitnog djelovanja premaza

Premazi svoju zaštitnu funkciju ostvaruju preko tri glavna principa dodavanjem odgovarajućih pigmenata [20]:

- učinkom barijere
- učinkom inhibitora
- galvanskim učinkom.

Učinak barijere

Primjenom debelih premaza (od 250 do 500 μm) s vrlo niskom propusnošću za vodu postiže se učinak barijere. Barijera zadržava nabijene ione i usporava prodor vode i kisika prema površini. Upravo zbog toga, ovaj učinak je vrlo često jedino rješenje kod čelika koji su neprekidno uronjeni. Ako se primjene listićavi pigmenti, tada se isti učinak može postići s manjom debljinom filma. Njihovom primjenom višestruko se povećava put difuzije reaktanata i produkata korozije kroz premaz. Osim toga, listićavi pigmenti reflektiraju elektromagnetsko i drugo zračenje te na taj način koče degradaciju i povećavaju trajnost zaštite [20].

Učinak inhibitora

Primjenom temeljnih premaza s inhibitorским pigmentima, koji koče ionizaciju metala pasiviranjem površine, tvorbom netopljivih slojeva korozijskih produkata te neutralizacijom kiselih tvari iz okoline, postiže se učinak inhibitora [20]. Inhibirajući premazi se ne koriste u uronjenim konstrukcijama s obzirom da reagiraju s vodom tj. privlače vodu u premaz, što rezultira propadanjem. Oni se uglavnom koriste za zaštitu u atmosferskim uvjetima.

Galvanski učinak

Kugličastim pigmentom od praškastog cinka u temeljnim premazima za čelik i lijevano željezo ostvaruje se galvanski učinak. U takvom članku, cink je manje neplemenit metal te će biti izložen koroziji, dok će podloga od čelika biti zaštićena. Najmanja propusnost postiže se primjenom kugličastih pigmenata sa širokim rasponom ekvivalentnih promjera, što osigurava bolju popunjenosti međuprostora između pigmentnih čestica [20].

7.1.5. Priprema površine

Radi boljeg prijanjanja prevlake, površinu konstrukcijskog materijala potrebno je pripremiti u pogledu čišćenja i kondicioniranja. Kondicioniranje obuhvaća zadovoljenje određene hrapavosti površine, dok se čišćenjem uklanjaju sva onečišćenja, masne tvari, prašina, pepeo itd. Ovisno o tehnologiji prevlačenja, kvalitetna priprema površine zahtjeva nekoliko operacija, a one načelno uključuju [20]:

- odmašćivanje
- mehaničku operaciju
- kemijske operacije.

Odmašćivanje služi za odstranjivanje bioloških i mineralnih tvari s površine metala i neophodno je u pripremi površine za nanošenje prevlaka radi boljeg prijanjanja prevlake na metalnoj površini. Postupak odmašćivanja provodi se fizikalnim otapanjem u hlapivim organskim otapalima, razrjeđivačima, lužnatim otapalima, mlazom vodene pare, ultrazvučno i spaljivanjem.

Od mehaničkih operacija ističe se ručno mehaničko čišćenje koje se koristi za uklanjanje boje, hrđe ili kamenca i to primarno na manjim mjestima te strojno mehaničko čišćenje koje se provodi korištenjem električnih ili pneumatskih uređaja na koje se montiraju mehanički alati za četkanje ili grebanje (brušenje). Jedna od ekološki prihvatljivijih rješenja za pripremu površine je i tehnika čišćenja vodenim mlazom koja se temelji na energiji udara vode o površinu bez primjene abraziva. Ovim postupkom uklanjaju se masnoće, stare boje, soli, rahli korozijski produkti, međutim, ne daje veći profil hrapavosti podloge potreban za nanošenje premaza te se zbog toga koristi na površinama gdje već postoji određeni profil hrapavosti ostvaren čišćenjem mlazom abraziva. Također, uzrokuje i brz nastanak površinske korozije obrađene površine. Ovaj postupak pogodan je za veće površine. Čišćenje površine mlazom abraziva provodi se suhim ili mokrim mlazom čestica čija se kinetička energija u trenutku sudara pretvara u mehanički učinak, a osigurava uklanjanje rahlih onečišćenja s površine te utiskuje materijal uz otvrdnjivanje [20]. Nagrizanje kiselinom odnosno, kiselinsko dekapiranje, najvažniji je postupak kemijskog odstranjivanja korozijskih produkata čime se otapa hrđa i okujina s ugljičnog i niskolegiranog čelika te lijevanog željeza. Najčešće se koriste 3 do 20 %-tne otopine sumporne i klorovodične kiseline. Kako kiseline, nakon što

uklone korozijske produkte, nagrizzaju željeznu osnovu, dodaju im se inhibitori korozije (štedno dekapiranje). Također, postoji i lužno dekapiranje koje se najčešće primjenjuje za aluminij i njegove legure. Koristi se 10 %-tna otopina NaOH u koju se ne može dodavati inhibitore, stoga se ovaj postupak mora pozorno nadgledati i na vrijeme prekinuti kako se ne bi oštetio proizvod [20].

7.1.6. Nanošenje premaza

Od presudne važnosti, za sustav premaza, je i način nanošenja samog premaza. Odabir postupka nanošenja ovisi o samoj vrsti premaza, veličini i obliku površine, brzini rada, uvjetima ventilacije te prihvatljivosti za okoliš. Premazi se mogu nanositi: četkama, lopaticama, valjcima, prskanjem (zračno, bezračno, elektrostatičko), uranjanjem i prelijevanjem i elektroforezom. Najveću produktivnost nanošenja boje ima postupak prskanja boje, i to posebno bezračno prskanje.

7.2. Vodorazrjeđivi premazi

S obzirom da se u novije vrijeme velika pažnja obraća na zadovoljavanje ekoloških regulativa i poštivanje zakona o dopuštenoj količini ispuštanja organskih otapala u okoliš, potrebno je voditi računa i o odabiru sustava za antikorozijsku zaštitu. Prvenstveno se obratila pozornost na smanjenje udjela organskih otapala u premazima. Naime, njihovom se primjenom oslobađaju emisije koje onečišćuju okoliš. Zbog toga su stručnjaci morali razviti alternativna rješenja, odnosno ekološki prihvatljive premaze u koje spadaju i vodorazrjeđivi premazi.

7.2.1. Svojstva vodorazrjeđivih premaza

Osim što su ekološki prihvatljivi, vodorazrjeđivi premazi pružaju iznimno dobru zaštitu od korozije i to u gotovo svim korozivnim sredstvima. Ovi premazi kao otapalo i razrjeđivač koriste vodu te sadržavaju minimalnu količinu organskih otapala. Također, koriste antikorozivne pigmente koji ne sadržavaju teške metale, olovo i krom, koji su otrovni. Udio otapala u vodenim premazima iznosi maksimalno 20 %, ovisno radi li se o vodotopljivim ili vodorazrjeđivim premazima [20].

Proces stvaranja vodenih premaza kompliciraniji je nego kod premaza na bazi otapala. Svaka komponenta premaza na bazi vode ima svoju funkciju i zbog toga je bitno obratiti posebnu pozornost na odabir tih komponenti. Stvaranje filma ovih premaza sastoji se od nekoliko faza:

- u prvoj fazi dolazi do hlapljenja vode i vodorazrjedivih otapala, ostavljajući za sobom gusto složeni sloj disperziranih polimernih čestica s mikroskopskim kanalićima između njih koji s vremenom nestaju
- druga faza obuhvaća deformiranje čestica iz svog sfernog oblika što za posljedicu ima nastanak kontinuiranog, ali tankog filma
- treća faza obuhvaća proces koalescencije (povezivanje, srašćivanje) u kojem se čestice povezuju i umrežavaju jačajući film.

S obzirom da je proces stvaranja filma vodenih premaza dugotrajan, dodaju se organska otapala koja ubrzavaju taj proces. Kako organska otapala, prilikom formiranja filma, ishlapljaju, postoji određena štetna emisija u atmosferu, međutim, ona je još uvijek u dozvoljenim granicama [20].

Prilikom nanošenja ovih premaza potrebno je voditi računa o pripremi površine na koju se nanose. Zbog visokog dipolnog momenta molekula vode, voda ima visoku površinsku napetost čime je otežano prodiranje premaza u neodmašćene i neočišćene metalne podloge. Svaka manja nepravilnost podloge uzrokovat će loše prijanjanje vodorazrjedivih premaza i nepravilnosti na podlozi.

Postupak samog nanošenja vodorazrjedivih premaza sličan je kao i kod premaza na bazi otapala. Najbitnije je obratiti pažnju na temperaturu koja mora biti $> 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Optimalna temperatura za stvaranje jednokomponentnog homogenog filma je oko $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, a da bi se omogućilo nanošenje premaza i na nižim temperaturama, premazima se dodaju razni koalescenti. Za dvokomponentne vodorazrjedive premaze ne postoje granične vrijednosti temperature, stoga dodavanje koalescenata nije nužno. Međutim, stvaranje filma na nižim temperaturama zna biti dugotrajno, što za posljedicu ima pojavu grešaka, stoga se ipak dodaju koalescenti. Osim toga, bitnu ulogu ima i relativna vlažnost zraka koja mora biti $< 85\%$. Pri visokoj relativnoj vlazi zraka, voda kao otapalo sporo ishlapluje te je vrijeme sušenja filma predugo, čime postoji mogućnost nastanka grešaka na površini premaza. S

druge strane, nanošenje premaza pri relativno niskoj vlažnosti zraka uzrokuje prebrzo sušenje filma. Vodorazrjedive premaze karakterizira i svojstvo reološke anomalije³ [20].

7.2.1.1. Sušenje vodorazrjedivih premaza

I kod ovih premaza sušenje se može odvijati fizikalno i kemijski. Nakon nanošenja premaza na podlogu, hlapljenjem vode, započinje fizikalno sušenje. Tijek procesa fizikalnog sušenja, presudnu ulogu ima odabir koalescenata s obzirom da on snižava minimalnu temperaturu stvaranja filma i viskoznost polimera.

7.2.1.2. Prednosti i nedostaci vodorazrjedivih premaza

Najveća prednost vodorazrjedivih premaza definitivno je njihova ekološka prihvatljivost, odnosno smanjene emisije štetnih tvari u okolinu. Međutim, najveći nedostatak im je osjetljivost primjene na relativnu vlažnost zraka i temperaturu (Tablica 4.).

Tablica 4. Prednosti i nedostaci vodorazrjedivih premaza [20]

PREDNOSTI	NEDOSTACI
○ ekološka prihvatljivost- smanjena emisija organskih hlapivih spojeva u atmosferu	○ osjetljivost na temperaturu nanošenja (minimalna temperatura 5 °C)
○ mogućnost primjene na različitim materijalima	○ osjetljivost na relativnu vlažnost zraka prilikom nanošenja (> 85 %)
○ kraći međupremazni intervali	○ osjetljivost na slabiju pripremu površine
○ manja zapaljivost	○ manja temperaturna otpornost
○ manja otrovnost i miris	○ manja korozijska otpornost prema agresivnim medijima
○ veća sigurnost za okolinu i radnike	○ teže dobivanje visokosjajnih površina
○ lako čišćenje alata vodom	○ sklonost pjenjenju
○ manji troškovi zbrinjavanja opasnog otpada	○ viša cijena
○ primjena konvencionalnih postupaka	○ kompliciranije skladištenje u temperiranim skladištima

³ Reološka anomalija ili pojava tzv. vodenog brijega posljedica je svojstva premaza koji se mogu razrjeđivati samo do neke granice, a kada se ta granica prijeđe premaz više nije prikladan za korištenje. Općenito, reološko je ponašanje moguće definirati kao njutnovsko: bez obzira na promjenu sile na tekućinu, viskoznost ostaje ista i nenjutnovsko: promjena viskoznosti s promjenom sile [20].

Ovisno o potrebama i željama korisnika, prilikom odabira odgovarajućeg sustava premaza za zaštitu od korozije treba voditi računa o faktorima kao što su potrošnja energije, ekonomičnost, učinkovitost, ekološki utjecaj te zahtjevnost tehnologije. Usporedba različitih vrsta premaza u ovisnosti o tim faktorima prikazana je u Tablici 5.

Tablica 5. Usporedba različitih vrsta premaza [20]

Vrsta premaza	Ekologija	Energija	Učinkovitost	Zahtjevnost	Ekonomičnost
premazi na bazi otapala	-	+	+	+	+
premazi s najvećim udjelom suhe tvari	°	+	°	+	+
vodorazrjedivi premazi	+	°	+	°	°
praškasti premazi	+	-	+	°	°

+ *prednost*

- *nedostatak*

° *manje povoljno*

Može se zaključiti da su premazi na bazi otapala, ako zanemarimo ekološki utjecaj, najbolji izbor. Osim što su učinkoviti, pristupačni su i cijenom. Jedini im je nedostatak što nisu ekološki prihvatljivi. Međutim, ekološka prihvatljivost i utjecaj na zdravlje danas ima presudnu ulogu i zbog toga je taj nedostatak nedopustiv. Jedna od mogućnosti zamjene je primjena premaza s visokim udjelom suhe tvari u uvjetima kada se ne mogu primijeniti ostali ekološki prihvatljiviji premazi. S druge strane, praškasti premazi su ekološki prihvatljivi, međutim imaju ograničenu upotrebu zbog zahtjevnosti tehnologije nanošenja. Samim time im je i ekonomičnost relativno upitna. Vodorazrjedivi premazi su najbliži premazima na bazi otapala u pogledu korozijske zaštite, te tehnologije nanošenja, ali su zato znatno osjetljiviji i cjenovno zahtjevniji [20].

7.2.2. Vrste vodorazrjedivih premaza

S obzirom na način promjene veziva u tekuće stanje, vodorazrjedivi premazi se dijele na [20]:

- vodotopljive smole
- vodene disperzije
- vodene emulzije.

Iako su veziva za organske premaze uglavnom hidrofobna i nisu topiva u vodi, postoje neke vodotopljive smole, međutim vrlo su osjetljive na vodu nakon stvaranja filma, Zbog toga su smole, u kojima se umjesto organskih otapala koristi voda, morale povećati hidrofilnost polimernog sustava ugradnjom vodotopljivih grupa ili uvođenjem površinskih aktivatora, čime su dobivena vodotopljiva i vodorazrjediva svojstva.

Vodotopljivost smola postiže se neutralizacijom karboksilnih grupa s amonijakom ili hlapivim aminima, koji hlape za vrijeme stvaranja filma. Vodotopljive smole se sastoje od polimera niske relativne molekulske mase, a proizvedene su u organskom otapalu i reducirane vodom. Premazi na bazi vodotopljivih smola sadrže 30 do 40 % suhe tvari i 10 do 15 % pomoćnih organskih otapala (što je relativno puno). Ovi premazi imaju visok sjaj i dobru korozijsku postojanost [20].

Vodne disperzije (ili lateksi) spadaju u vodorazrjedive sustave koji su sastavljeni od disperzija krutih polimernih čestica, visoke relativne molekulske mase, u vodi. Njihove su, u vodi raspršene, polimerne čestice, za razliku od vodenih emulzija, manje i krute. Disperzije sadrže i malu količinu pomoćnih otapala (< 5 %). Najraširenije disperzije su akrilne boje koje svoju upotrebu pronalaze kako za vanjsku tako i za unutarnju zaštitu te imaju znatne prednosti u odnosu na uljne boje: brže se suše, bolja otpornost na lužine, prionjivost, dugotrajna elastičnost i čvrstoća.

Vodne emulzije su po svome sastavu vrlo slične vodenim disperzijama. One su po definiciji koloidi, odnosno sastavljene su od dvije faze od kojih su jedna faza polimerne čestice fino raspršene u drugoj fazi, vodi. Zahvaljujući svojstvu netopivosti polimernih čestica u vodi, čime se omogućuje povećanje njihove molekulske mase i samim time povećanja njihove postojanosti (povećanje molekulske mase bez utjecaja na viskoznost), emulzijski premazi

pokazuju najbolja mehanička svojstva (naročito čvrstoću), kemijska svojstva, najveću trajnost te najveću otpornost u odnosu na ostale vodorazrjedive premaze (Tablica 6.) [20].

Tablica 6. Svojstva dviju različitih vrsta premaza na bazi vode [20]

	Vodotopljivo vezivo	Vodorazrjedivo vezivo
Molekulska masa	relativno niska	dosta visoka
Zamjena organskih otapala vodom (reformulacija smola)	neutralizacijom	ugradnjom hidrofilnih grupa na polimernu matricu; miješa se s vodom radi hidrofilnog dijela molekule
Reološka svojstva	reološka anomalija prilikom razrjeđivanja	gotovo njutnovsko ponašanje
Koalescenti (pomoćna organska otapala)	relativno velika količina koalescenata	mali dodatak koalescenata
Sušenje	slabo fizikalno sušenje; potrebne visoke temperature ili umrežavanje s kisikom	zbog molekulske mase iznimno brzo fizikalno sušenje
Pigmentiranje	lako dispergira pigmente, stabilna struktura	otežana disperzija pigmenata u vezivu, može doći do uništenja veziva pri ribanju
Sjaj	visokosjajni premazi s lijepim izgledom filma	ograničen sjaj zbog brzog umrežavanja veziva i mliječnosti disperzije

7.2.3. Primjena vodorazrjedivih premaza

Osim za bojanje čeličnih konstrukcija, mostova, spremnika, automobilskih dijelova, poljoprivrednih strojeva, raznih spremnika i dr., vodorazrjedivi premazi u novije vrijeme pronalaze svoju primjenu na tešku industriju poput naftnih i plinskih postrojenja, morskih i kemijskih postrojenja. Još uvijek je udio vodorazrjedivih premaza u teškoj industriji, u odnosu na ostale premaze, malen, ali konstantno raste.

Postoji nekoliko vodorazrjedivih sustava premaza koji se primjenjuju u praksi, a usklađeni su sa normama HRN EN ISO 12944 i NORSOK M-501 za odgovarajuće kategorije korozivnosti (Poglavlje 8.1.1.).

1. akrilni temeljni sloj + akrilni završni sloj

- prema normi HRN EN ISO 12944
- kategorija korozivnosti C2-C3
- za laganu korozijsku zaštitu konstrukcijskog čelika
- kao troslojni, primjenjiv i za zaštitu konstrukcija na otvorenom

2. epoksi temeljni sloj + akrilni završni sloj

- prema normi NORSOK M-501
- kategorija korozivnosti C5
- naftna industrija.

8. KOROZIJSKA ZAŠTITA VJETROTURBINA

U odnosu na *onshore* vjetroelektrane, *offshore* vjetroelektrane znatno su više izložene uvjetima koji su s korozijskog aspekta iznimno nepovoljni. Osim klasičnih *offshore* vjetroelektrana, i vjetroparkovi pozicionirani u blizini morske obale (od strane kopna) su također puno više izloženi korozijskom utjecaju. Iz iskustva se zna da primjenom tehnologija *onshore* vjetroturbina na *offshore* vjetroturbine može završiti katastrofalno. Razlika u vijeku trajanja objekta, pristupačnosti za obavljanje radova održavanja kao i ekonomski uvjeti rezultiraju odabirom drugih vrsta sustava zaštite za vjetroturbine. Odabir odgovarajućeg sustava premaza u svrhu zaštite od korozije vjetroelektrana, osim financijski, trebao bi zadovoljavati i mnoge druge čimbenike kako bi se postiglo najučinkovitije rješenje.

U regulaciji zaštite od korozije vjetroelektrana u Europi se ističu dva standarda:

- DIN EN ISO 12944: Zaštita od korozije čeličnih konstrukcija zaštitnom bojom
- NORSOK M 501: Pripremanje podloge i zaštitni premaz.

8.1. Odabir odgovarajućeg sustava premaza

Odabir odgovarajućeg sustava premaza za zaštitu od korozije uključuje čitav niz čimbenika koje valja uzeti u obzir kako bi se osiguralo najekonomičnije i tehnički najbolje rješenje. Korozivnost okoliša, vrsta površine koju treba zaštititi, odgovarajuća trajnost sustava premaza te planiranje samog postupka nanošenja boje najbitniji su čimbenici koje treba uzeti u obzir prije nego što se započne s odabirom zaštitnog premaza [21].

8.1.1. Korozivnost okoliša

Prilikom odabira sustava premaza od ključne je važnosti razraditi uvjete u kojima će konstrukcija raditi (Tablica 7.). Kako bi se ustanovio učinak korozivnosti okoliša, potrebno je uzeti u obzir sljedeće čimbenike:

- vlažnost i temperaturu
- prisutnost UV zračenja
- kemijska izloženost
- mehanička oštećenja.

U slučaju kada se radi o zakopanim konstrukcijama, potrebno je uzeti u obzir njihovu korozivnost i uvjete tla kojima su one izložene. Od presudne je važnosti vlažnost tla i njegov pH kao i biološka izloženost utjecaju bakterija i mikroorganizama. Kada se radi o vodenom okolišu bitno je utvrditi vrstu vode i njezin kemijski sastav. Treba imati na umu da što je okoliš korozivniji to će tražena priprema površine biti zahtjevnija. Također treba pomno ispoštovati međupremazne intervale [21].

Korozivna agresivnost okoliša utjecat će na:

- vrstu boje koja se koristi za zaštitu
- ukupnu debljinu sustava premaza
- potrebnu pripremu površine
- minimalne i maksimalne međupremazne intervale.

Tablica 7. Kategorije atmosferske korozivnosti prema standardu ISO 12944 [21]

Kategorija korozivnosti	Primjeri okoliša	
	Vanjski	Unutarnji
C1 jako niska	-	Grijanje zgrade sa čistom atmosferom, poput ureda, dućana, škola, hotela
C2 niska	Lagano onečišćena atmosfera, uglavnom ruralna područja	Negrijane zgrade u kojima može doći do pojave kondenzacije, npr. spremišta, sportske dvorane
C3 srednja	Industrijska i urbana atmosfera s prosječnom razinom onečišćenja sumpornim dioksidom (IV). Priobalna područja niskog saliniteta.	Proizvodni objekti s visokom vlažnošću i određenim stupnjem onečišćenja zraka, npr. tvornice hrane, praonice, pivovare, mljekare
C4 visoka	Industrijska i priobalna područja srednjeg saliniteta	Kemijske tvornice, bazeni, remontna brodogradilišta
C5-I jako visoka (industrijska)	Industrijska područja s vrlo visokom vlažnošću i agresivnom atmosferom	Zgrade i površine sa gotovo konstantnom kondenzacijom i visokom razinom onečišćenja
C5-M jako visoka (morski okoliš)	Priobalje i pučina s visokom razinom saliniteta	Zgrade i površine sa gotovo konstantnom kondenzacijom i visokom razinom onečišćenja

Kategorijom korozivnosti C3 opisani su zahtjevi postavljeni za korozijsku zaštitu *onshore* vjetroelektrana. C5-M kategorija korozivnosti opisuje uvjete kojima su podvrgnute *offshore* vjetroelektrane.

Tablica 8. Kategorije vode i tla u skladu sa standardom ISO 12944 [21]

Kategorija korozivnosti	Okoliš	Primjeri okoliša i konstrukcija
Im1	Slatka voda	Instalacije na rijekama, hidroelektrane
Im2	Morska ili bočata voda	Morske luke sa sljedećom opremom: vata ustave, brane, podesti iznad vode, gatovi, konstrukcije na pučini
Im3	Tlo	Podzemni spremnici, čelični podesti, cjevovodi

Presudnu ulogu u odabiru pouzdane antikorozijske zaštite ima očekivani korozijski uvjeti okoliša u kojem se vjetroturbine nalaze te očekivani vijek trajanja. Prema Tablici 7. definirano je 5 kategorija korozivnosti od C1 koji predstavlja unutarnju nekorozivnu atmosferu pa sve do industrijske (C5-I) i morske klime (C5-M). Tablica 8. prikazuje razinu uronjenosti konstrukcije u vodi i tlu (*eng. Immersion- I*). Za određivanje kategorije presudnu ulogu ima gubitak mase odnosno debljine nezaštićenog i pocinčanog čelika u vanjskim uvjetima (Tablica 9.).

Tablica 9. Gubitak debljine/mase nezaštićenog niskougliječnog čelika

Kategorije korozivnosti prema DIN EN ISO 12944:	Gubitak masa/debljina u prvoj godini	
	Gubitak mase	Gubitak debljine [μm]
Onshore C3 - Industrijska i urbana atmosfera, obalna područja s niskim salinitetom. Tipična mjesta za <i>onshore</i> vjetroeletreane	200 - 400 g/m ²	25 - 50
Offshore C5 - Obalna i pučinska područja visokog saliniteta	650 - 1500 g/m ²	80 - 200

8.1.2. Vrste površina koju treba zaštititi

Prilikom odabira sustava premaza, u pravilu se radi o konstrukcijskim materijalima kao što je čelik, vruće-pocinčani čelik, metalizirani čelik, aluminij ili nehrđajući čelik. Priprema površine, premazni materijali koji se koriste (naročito temelj) i ukupna debljina filma uglavnom ovise o konstrukcijskim materijalima kojima je potrebna zaštita [21].

8.1.3. Tražena trajnost sustava premaza

Vijek trajanja premaza je pretpostavljeni vremenski protok od trenutka prvog nanošenja do prvog održavanja. HRN EN ISO 12944 specificira tri vremenska okvira koji kategoriziraju trajnost (Tablica 10.).

Tablica 10. Vremenska kategorizacija trajnosti prema HRN EN ISO 12944 [21]

NIZAK- L	2 do 5 godina
SREDNJI- M	5 do 15 godina
VISOK- H	više od 15 godina

8.1.4. Planiranje postupka nanošenja boje

Dinamika izgradnje i različite faze gradnje kod svakog projekta određuju kako i kada je potrebno nanositi sustav premaza. Potrebno je obratiti pažnju na materijale u fazi prije izgradnje, kada se sastavni dijelovi izrađuju izvan mjesta izvođenja radova i na gradilištu kada su faze izgradnje završene. Potrebno je planirati posao kako bi se moglo voditi računa o pripremi površine te vremenu sušenja/otvrdnjavanja u odnosu na vrijednosti temperature i vlažnost zraka. Nadalje, ukoliko se jedna faza izgradnje vrši u zaštićenom okolišu radionice, a sljedeća faza se vrši na gradilištu, potrebno je uzeti u obzir vrijednosti za međupremazni interval [21].

8.2. Ključne radnje uspješne korozijske zaštite

Kada je u pitanju izvršenost uspješne korozijske zaštite, treba reći da kvalitetan premaz ne predstavlja garanciju uspjeha. Sustav zaštite od korozije je uspješno izveden samo ako su ispunjeni svi preduvjeti da bi se ispravno nanijela boja. Neki od faktora koji utječu na kvalitetnu antikorozijsku zaštitu su:

- dizajn konstrukcije, mogućnost pristupa
- izgled rubova i zavarenih šavova
- stanje čelika prije pripreme površine
- priprema površine
- izbor zaštitne boje prema zadanim okolišnim uvjetima
- kvaliteta i priprema boje

- pravilno nanošenje zaštitne boje
- kontrola kvalitete sustava bojanja primjenom testiranja
- trenutna izloženost boje nakon izvršene aplikacije.

Valja naglasiti kako je sustav boja vrlo rijetko uzrok preranog otkazivanja sustava antikorozijske zaštite te da se razlozi neuspjeha istog većinom nalaze u pripremi površine, načinu apliciranja i izgledu konstrukcijskih dijelova [2]. U 68 % slučajeva, prerano otkazivanje sustava antikorozijske zaštite uzrokovano je neispravnom obradom odnosno krivim apliciranjem zaštitnih premaza. Pogrešna specifikacija također je čest uzrok otkazivanja sustava zaštite. Razlog navedenom je što industrija boja svoje proizvode daje u obliku dviju ili više komponenti reaktivne smole, dok je nanosioč taj koji stvara novu kemijsku tvar koja u konačnici pruža zaštitu od korozije. Ukoliko miješanje komponenti pri odgovarajućoj temperaturi i zadanom vremenu nije ispravno izvršeno tu dolazi do neuspjeha. Upravo je zbog toga potrebna stalna kontrola i nadzor od strane kvalificiranih ljudi. Prije nego se započne sa nanošenjem boje, konstruktor mora osigurati da struktura čelika bude izvedena što pogodnije za nanošenje boje kako ne bi došlo do korozije na rubovima i mjestima zavora. (Slika 21). prikazuje čelične površine koje je potrebno izbjegavati ili prepraviti tako da zadovoljavaju propisane norme. Naime, pod pripremom konstrukcijskog materijala podrazumijevamo uklanjanje kapljica nastalih pri zavarivanju te brušenje oštih rubova (radijus ne smije biti manji od 2 mm). Pore na zavarima se ne smiju prekrivati bojama niti popunjavati punilima, već se moraju obraditi u skladu sa zahtjevima (EN ISO 5813, kvalitete zavora B) zbog potencijalnog nastanka inicijalnog korozijskog mjesta [2].



Slika 21. Prikaz površina koje treba izbjegavati prilikom nanošenja AKZ [2]

Ispravna izvedba zavarivačkog šava od iznimne je važnosti ako se želi postići uspješna antikorozijska zaštita nanošenjem premaza. Loše izveden oblik zavara uzrokovat će pojavu korozije na čeliku u vrlo kratkom vremenu.

8.2. Korozijska zaštita onshore vjetroturbina

8.2.1. Sustavi korozijske zaštite stupa onshore vjetroturbina

Iz Tablice 9. vidimo da je tipično mjesto za *onshore* vjetroelektrane okarakterizirano kategorijom korozivnosti C3. S obzirom da su *onshore* vjetroelektrane izložene manje opasnom korozijskom okruženju, u odnosu na *offshore* instalacije, bitno je naglasiti da su i sustavi zaštite različiti. Vjetroturbine se uglavnom projektiraju na vijek trajanja duži od 15 godina. Isto toliko vremena očekuje se da i sustav premaza izdrži nametnute uvjete. Prema tim uvjetima, a u skladu s HRN EN ISO 12944, 5. dio, preporučaju se različiti sustavi s više premaza i sa suhim filmom ukupne debljine između 160 - 240 μm (Tablica 11.) [22].

Tablica 11. Sustav premaza za kategoriju korozivnosti C3 prema EN ISO 12944 [22]

Razina pripreme površine		Temeljni premaz(i)				Završni premaz(i) uključujući i međupremaz(e)			Sustav boje		Očekivana trajnost													
St2 *	Sa 2 ^{1/2} *	Vezivo EP	Vrsta primera	Broj premaza	NDFT **μm	Vezivo AY	Broj premaza	NDFT μm	Broj premaza	NDFT μm	Niska	Srednja	Visoka											
	X			EP, PUR	1-2	80	-	-	-	1-2				80										
	X														EP, PUR	1 <th rowspan="3">40<th rowspan="3">2-3<th rowspan="3">160</th></th></th>	40 <th rowspan="3">2-3<th rowspan="3">160</th></th>	2-3 <th rowspan="3">160</th>	160					
	X																			EP, PUR	1-2 <th rowspan="2">80<th rowspan="2">2-3<th rowspan="2">160</th></th></th>	80 <th rowspan="2">2-3<th rowspan="2">160</th></th>	2-3 <th rowspan="2">160</th>	160
	X																							
	X			EP, PUR	1-2 <th rowspan="2">80<th rowspan="2">AY, Cr, PVC</th><th rowspan="2">1-2<th rowspan="2">120<th rowspan="2">2-3<th rowspan="2">160</th></th></th></th></th>	80 <th rowspan="2">AY, Cr, PVC</th> <th rowspan="2">1-2<th rowspan="2">120<th rowspan="2">2-3<th rowspan="2">160</th></th></th></th>	AY, Cr, PVC	1-2 <th rowspan="2">120<th rowspan="2">2-3<th rowspan="2">160</th></th></th>	120 <th rowspan="2">2-3<th rowspan="2">160</th></th>	2-3 <th rowspan="2">160</th>				160										
	X	ESI	1 <th rowspan="2">80<th rowspan="2">-</th><th rowspan="2">-</th><th rowspan="2">-</th><th rowspan="2">-</th><th rowspan="2">-</th></th>								80 <th rowspan="2">-</th> <th rowspan="2">-</th> <th rowspan="2">-</th> <th rowspan="2">-</th> <th rowspan="2">-</th>	-	-		-	-	-							

*razina pripreme površine prema ISO 8501-1: 1988

** NDFT (eng. Nominal Dry Film Thickness)- nominalna debljina suhog filma

EP- epoksi, PUR- poliuretan, Zn (R)- pigment cinkov prah, ESI- etil silikat, PVC- polivinilklorid, Cr- klorkaučuk, AY- akril

Rezultati iz tablice 11. dani su u odnosu na očekivani vijek zaštite (trajnost) i to na način: niska trajnost (2-5 godina), srednja trajnost (5-15 godina), visoka trajnost (>15 godina). Međutim, oni ne daju garanciju vremenskog perioda potrebnog za prvo održavanje vezano uz

korozijsku zaštitu, ali olakšavaju odabir sustava zaštite ovisno o željenom vijeku trajanja [22].

Tipičan sustav zaštite za *on-shore* vjetroturbine je 3-slojni sustav koji se sastoji od [22]:

2k- cink epoksi temeljni premaz	50 - 80	μm
2k- epoksi među premaz	100 - 150	μm
2k- poliuretan završni premaz	50 - 80	μm

Također postoji mogućnost primjene efikasnog 2-slojnog premaza kao npr. [22]:

2k- cink epoksi temeljni premaz	80	μm
2k- poliuretan završni premaz	120	μm

Primjena klasičnih i najčešće korištenih trokomponentnih sustava premaza pokazuje uobičajenu debljinu premaza od 240 do 280 μm, gdje debljina od 280 μm praktički zadovoljava najveću kategoriju korozivnosti C5 (u industriji). Zbog spomenutih razloga (dugi vijek trajanja bez održavanja, ograničeni pristup, lokacija na obali) ovi sigurnosni okviri su prihvatljivi. No 200 μm na vanjskim površinama i 160 μm na unutarnjim površinama (ako govorimo o čeličnim tornjevima) bi trebali biti najniža granica za *onshore* vjetroturbine.

8.2.2. Sustavi korozijske zaštite dijelova *onshore* vjetroturbina

Predložene vrijednosti su prvenstveno povezane s komponentama izloženim stabilnoj atmosferi kao što je vanjšina čeličnih tornjeva ili glavčine. Ostali dijelovi vjetroturbine (generator, zakretnik, vratilo rotora, glavni okvir itd.) i unutrašnjost stupa mogu se štititi na sličan način, ali se također mogu primijeniti i manje debljine premaza (Tablica 12.). Razlog tome je što se, tijekom eksploatacije, temperatura kondenzacije (unutar gondole) rijetko postiže, dok ostali dijelovi nikada niti neće biti u kontaktu s atmosferom [22].

Tablica 12. Klasični sustav zaštite *onshore* vjetroturbine kategorije korozivnosti C3

SUSTAV ZAŠTITE ZA VJETROTURBINE (uvjeti okoliša C3***, trajnost > 15 godina)					
Uvjeti (Dijelovi)	Priprema površine	Temeljni premaz	Među premaz	Završni premaz	Ukupna debljina (DSF*) (μm)
Vanjske površine (utjecaj atmosferilija)	-abrazivno čišćenje (pjeskarenje/sačmarenje) do kvalitete Sa 2 ^{1/2} ISO 8501-1:1988**	2k- cink epoksi temeljni premaz, debljina suhog filma: 80 μm ISO 12944:1998*	2k- epoksi među premaz Debljina suhog filma: 100 μm ISO 12944:1998*	2k-poliuretan završni premaz, debljina suhog filma: 60 μm ISO 12944:1998*	Min. 240
Površine u zatvorenom prostoru	-abrazivno čišćenje (pjeskarenje/sačmarenje) do kvalitete Sa 2 ^{1/2} ISO 8501-1:1988**	2k- cink epoksi temeljni premaz, debljina suhog filma: 80 μm ISO 12944:1998*	2k- epoksi među premaz Debljina suhog filma: 80-100 μm ISO 12944:1998*	2k-epoksi završni ili međupremaz, debljina suhog filma: 60 μm ISO 12944:1998*	220-240
Generator (zatvoreni prostor)	-abrazivno čišćenje (pjeskarenje/sačmarenje) do kvalitete Sa 2 ^{1/2} ISO 8501-1:1988**	2k- epoksi temeljni premaz, debljina suhog filma: 60 μm ISO 12944:1998*	2k- epoksi među premaz Debljina suhog filma: 80 μm ISO 12944:1998*	2k-epoksi završni ili među premaz, debljina suhog filma: 60 μm ISO 12944:1998*	200
Površine koje se ugrađuju u beton	-abrazivno čišćenje (pjeskarenje/sačmarenje) do kvalitete Sa 2 ^{1/2} ISO 8501-1:1988**	2-kom. cink epoksi temeljni premaz Debljina nanosa: 1 x 50 μm ISO 12944:1998*			50
Konačno obrađene površine	-čišćenje -odmaščivanje	Privremena zaštita: Površine se zaštićuju sredstvom na bazi voska i inhibitora korozije (npr. TECTYL 506): 1 x 20 μm Prije montaže se skida white špiritom			20
Dijelovi opreme	Kemijska obrada	Vruće cinčanje prema normi EN ISO 1461:1999			Ovisno o debljini osnovnog materijala
Dijelovi opreme	Kemijska obrada	Fosfatiranje..... mangan fosfat; Class 1; 10 do 30 g/m ² DIN 50942; BS 3189; MIL-P-16232			10-12
Obradeni dijelovi sklopova koji se o potrebi demontiraju (mali zazor)	Odmaščivanje	Zaštita od korozije sredstvom Loctite 7803 (neljepljiv premaz koji se ne suši a osigurava dugotrajnu zaštitu)			

* ISO 12944, Prt 1-8: 1998 Zaštita od korozije čeličnih konstrukcija zaštitnim sustavima boja (Corrosion protection of steel structures by protective paint systems)

** ISO 8501-1: 1988/ SIS 05 59 00 Priprema čelika za nanošenje boja i premaza (The preparation of steel for the acceptance of paints and coatings)

*** HRN EN ISO 12944-2: 1999 C3 Umjereno korozijsko opterećenje (gradska i industrijska atmosfera s umjerenim sadržajem sumpornog dioksida i slabim utjecajem slane magle)

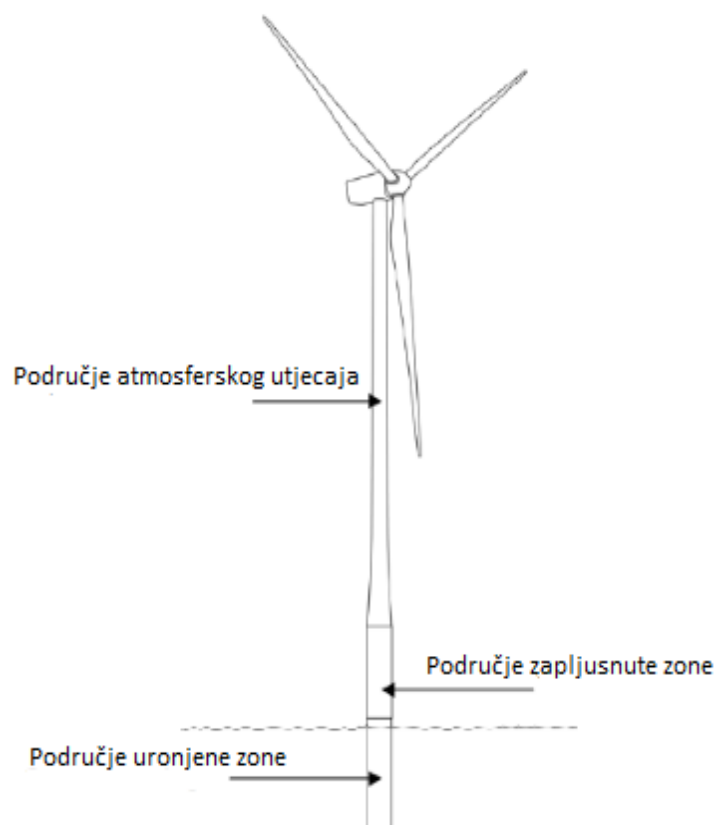
*DSF- debljina suhog filma

8.3. Korozijska zaštita *offshore* vjetroturbina

S obzirom da su *offshore* vjetroelektrane izložene teškim i složenim eksploatacijskim uvjetima, podložni su utjecaju korozijskih i bioloških procesa te mehaničkih opterećenja. U pogledu zaštite od korozije, morska atmosfera ima najštetniji utjecaj na konstrukciju. Morski okoliš karakteriziraju veliki temperaturni gradijenti, erozijski procesi, UV zračenja, stvaranje leda te izmjena vlažnih i suhih ciklusa. More i vjetar u kombinaciji izazivaju rasprskavanje morske vode što također doprinosi stvaranju korozije [2].

8.3.1. Korozijska područja stupova *offshore* vjetroturbina

Korozijski najizloženije i najugroženije mjesto off-shore vjetroelektrana je stup koji je u direktnom kontaktu s morem, valovima, UV zračenjem, ledom itd. Stup takve konstrukcije podijeljen je u 3 zone (Slika 22.) za koje se postavljaju različiti sustavi zaštite od korozije koji su definirani i različitim standardima.



Slika 22. Korozijom zahvaćene zone stupa *offshore* vjetroatregata [23]

8.3.1.1. Uronjena zona

Područje uronjene zone konstantno je izloženu djelovanju morske vode, salinitetu, bakterija, algi, morske trave, itd. U ovoj se zoni zaštita od korozije osigurava kombinacijom premaza i katodne zaštite. Primarna funkcija premaza, u ovoj zoni, nije zaštita od korozije već ograničavanje strujnih zahtjeva za katodnu zaštitu. Katodna zaštita je dobro utvrđena tehnologija opisana standardima. Dakle, zaštita od korozije vanjskih površina uronjene zone ne bi trebala biti problem [2].

8.3.1.2 Zapljusnuta zona

Visina zapljusnute zone definirana je DNV-OS-F101 standardom. Prema standardnoj atmosferskoj plimi, visini valova, silaznim i uzlaznim kretnjama definira se gornja i donja granica zapljusnute zone. Ovi parametri ovise o geografskom položaju i tipu konstrukcije (da li je plutajuća ili pričvršćena za morsko dno) [24]. Konstrukcija je u ovom dijelu gotovo stalno izložena morskoj vodi, djelovanju valova i zraka, plime i oseke, ograničenoj ili gotovo nikakvoj katodnoj nikakvoj katodnoj zaštiti, ali nije pod utjecajem obrastanja. Područje zapljuskivanja je najagresivnije od svih ostalih zona. Udarci valova i tendencija stvaranja malih zračnih mjehurića u morskoj vodi također pridonose odvajanju zaštitnih prevlaka i premaza od metalne konstrukcije te tako znatno brže uništavaju iste. Metali poput nehrđajućeg čelika i titana pokazuju otpornost u ovom području jer su okruženi zrakom koji utječe na pasivnost materijala. Najveća oštećenja primjećuju se na području odmah ispod vodene linije jer uronjeni materijal dobiva zaštitu na korist drugog materijala. S obzirom da je na ovom području razina vode promjenjiva (plima i oseka) i postoji dovoljna opskrbljenost kisikom, nije vjerojatno da će se razviti katodna polarizacija kao što je vjerojatno na određenom konstantno uronjenom dijelu [2].

Ispitivanje premaza i njihovo održavanje u zapljusnutoj zoni je teško i skupo zbog poteškoća uklanjanja vode na tom području. Kako bi se izbjeglo održavanje premaza, koriste se trajni i skupi premazi od poliestera, vulkanizirana guma ili nasprejani aluminij [24].

8.3.1.3. Atmosferska zona

U ovoj zoni ne postoji direktan kontakt s morem, međutim komadići soli ili fina morska magla koja se nakuplja na metalnoj površini itekako utječe na oštećivanje konstrukcije.

Koliko visoko iznad morske razine će atmosferska zona biti zahvaćena korozijom ovisi o vjetru i gibanjima mora. Fotosenzitivne korozijske reakcije metala bakra i željeza mogu se javiti uslijed sunčeve radijacije. U tropskim područjima, kombinacijom morske soli i koraljne prašine može doći do nastanka korozije. Također, količina i raspored kiše direktno utječe na količinu korozijskih produkata za određeno područje. Tako učestala kiša smanjuje mogućnost nastajanja korozije ispiranjem soli na dostupnim mjestima, dok na nedostupnim mjestima, zbog kontaminiranja morske soli i prašine, povećava vjerojatnost njezina nastanka. Općenito se može reći da je tropsko područje podložnije pojavi korozije od ostalih.

Sustav zaštite od korozije ove zone uglavnom se temelji na trokomponentnom ili dvokomponentnom sustavu epoksi premaza bogatih cinkom.

Tablica 13. Iznos napredovanja korozije nezaštićenog čelika u priobalnom području [2]

Korozijom zahvaćena područja	Iznos korozije ($\mu\text{m/god}$)	Iznos korozije (mm/god)
Uronjena zona	100-200	0,03-0,09
Zapljusnuta zona	200-500	0,12-0,27
Atmosferska zona	80-200	0,05-0,07

Zbog izrazitog napredovanja korozije, koje može dostići brzinu i do 0,27 mm/god (Tablica 13.), izbor materijala te dizajn konstrukcije imaju znatnu ulogu u povećanju rizika nastajanja korozije. Vrlo je bitno izbjegavati okna, procjepe ili bilo kakva potencijalna mjesta koncentracije vlage koja kao elektrolit potpomaže nastanku korozije. Također, obrada same površine ima vrlo važnu ulogu u pogledu uklanjanja pukotina i pora nastalih zavarivanjem ili oštih bridova.

8.3.2. Sustavi korozijske zaštite stupova offshore vjetroturbina

Prema Tablici 7., kategorija korozivnosti C5-M (M-morski okoliš), i Tablici 8., kategorija vode i tla Im2, predstavljaju uvjete kojima su izložene offshore vjetroturbine. Kao što je navedeno u Poglavlju 8., zaštita od korozije vjetroturbina bazira se na 2 osnovna standarda, međutim kada je riječ o offshore vjetroturbinama, postoje još neki standardi koje valja uzeti u obzir:

- DIN EN ISO 12944: Zaštita od korozije čeličnih konstrukcija zaštitnom bojom
- NORSOK M 501: Pripremanje podloge i zaštitni premaz
- ISO 20340: Boje i lakovi - Zahtjevi izvedbe zaštitne boje na *offshore* i sličnim strukturama
- NACE TM 0204, 0304 i 0404 [22].

HRN EN ISO 12944 preporuča sustav premaza s višeslojnom primjenom debljine između 320 μm i 500 μm (za atmosfersku zonu kategorije C5) i između 480 μm i 1.000 μm (uronjena zona kategorije Im 2) (Tablica 14.). Ovakav sustav osigurava 15 godina vremenskog perioda bez održavanja sustava korozije [22].

Tablica 14. Sustav premaza za kategoriju korozivnosti C5 prema HRN EN ISO 12944 [22]

Razina pripreme površine	Temeljni premaz(i)				Završni premaz(i) uključujući i međupremaz(e)			Sustav boje		Očekivana trajnost					
										C5-I			C5-M		
Sa 2 ^{1/2}	Vezivo	Vrsta primera	Broj premaza	NDFT μm	Vezivo	Broj premaza	NDFT μm	Broj premaza	NDFT μm	niska	srednja	visoka	niska	srednja	visoka
X	CR	razno	1-2	80	AY, CR, PVC	2	120	3-4	0						
X	EP, PUR		2	120		1-2	80	3-4	200						
X	ESI		1	80		3	200	4	280						
X	EP, PUR	Zn(R)	1	80	EP+Cr	4	240	5	320						
X			1	40		2	200	3	240						
X			1	40		3-4	280	4-5	320						
X	EP, PUR	razno	1	40	EP, PUR	2	120	3	160						
X			1	80		2	120	3	200						
X			1	40		3	200	4	240						
X	ESI	Zn(R)	1	80		2-4	160	3-5	240						
X	EP, PUR	razno	1	80		3	200	4	280						
X	ESI	Zn(R)	1	80		3	200	4	280						
X			1	80		2-4	240	3-5	320						
X			1	150		1	150	2	300						
X	EP, PUR	razno	1-2	80		3-4	240	4-6	320						
X			1	250		1	250	2	500						

*razina pripreme površine prema ISO 8501-1: 1988

** NDFT (eng. Nominal Dry Film Thickness)- nominalna debljina suhog filma

EP- epoksi, PUR- poliuretan, ESI- etil silikat, Zn(R)- pigment cinkov prah, AY- akril, CR- klorkaučuk

I ovdje su rezultati dani u odnosu na očekivani vijek zaštite (trajnost) i to na način: niska trajnost (2- 5 godina), srednja trajnost (5-15 godina), visoka trajnost (>15 godina), posebno

za atmosfersku zonu kategorije C5 i uronjenu (i zapljusnutu zonu) kategorije Im2.

NORSOK M 501 standard predlaže slične sustave zaštite. Za atmosfersku zonu određuje debljinu sloja od 280 μm (Tablica 15.), a za uronjenu i zapljusnutu zonu 350 μm (Tablica 16). Treba naglasiti kako NORSOK uvijek zahtjeva minimalnu debljinu, dok se prema HRN EN ISO 12944 standardu zahtjeva nominalna debljina [22].

Tablica 15. Sustav premaza za C5M, atmosferska zona, prema NORSOK M 501[22]

Primjena	Priprema površine	Sustav premaza	Minimalna debljina suhog filma
Ugljični čelik s radnom temperaturom < 120 °C	Čistoća: ISO 8501- 1 Sa 2 ^{1/2}	1 slojni temeljni premaz obogaćen cinkom:	60 μm
-konstrukcijski čelik -vanjšina opreme, spremnici, cjevovodi i ventili (bez izolacije)	Hrapavost: ISO 8503 ocjena: srednja G (50 μm do 85 μm , Ry5)	Minimalni broj premaza: 3 Minimalna debljina suhog filma gotovog sustava premaza:	280 μm

Tablica 16. Sustav premaza za Im2, uronjena zona, prema NORSOK M 50 [22]

Primjena	Priprema površine	Sustav premaza	Minimalna debljina suhog filma
Uronjeni ugljični čelik i ugljični čelik u zapljusnutoj zoni	Čistoća: ISO 8501- 1 Sa 2 ^{1/2} Hrapavost: ISO 8503 ocjena: srednja G (50 μm do 85 μm , Ry5)	Dvokomponentni epoksi premaz Minimalni broj premaza: 2	350 μm
Uronjeni nehrđajući čelik i nehrđajući čelik u zapljusnutoj zoni	Abrzivno čišćenje Abrazivi namijenjeni čišćenju nehrđajućih čelika bez željezovih oksida i klorida	Minimalna debljina suhog filma gotovog sustava premaza:	

U uronjenoj zoni, prema NORSOK standardu, potrebno je dodati i katodnu zaštitu u ukupni sustav premaza. Katodna zaštita može biti postavljena u sklopu konstrukcije ili zavarena na žrtvenu anodu [22].

Tipičan sustav zaštite za *offshore* vjetroturbine (atmosferska i zapljusnuta zona) sastoji se od [22]:

2k- cinkom obogaćen epoksi temeljni premaz	50 - 80	μm
2k- epoksi međupremaz	po potrebi 2 x	100 - 150
2k- poliuretan završni premaz	50 - 80	μm
ukupna minimalna debljina filma	320	μm

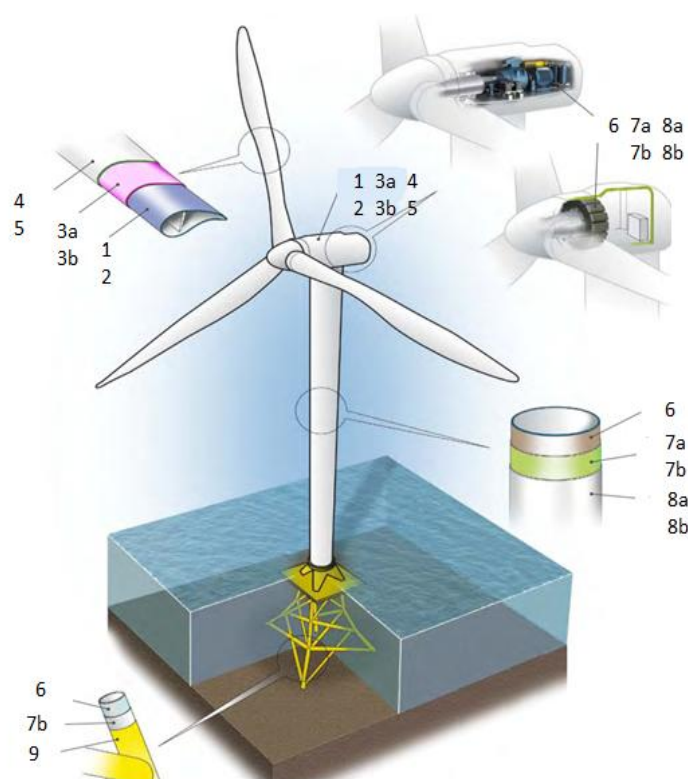
Za uronjenu zonu tipičan sustav zaštite *offshore* vjetroturbine sastoji se od [22]:

2 - 3 x epoksi premaz (pojedinačni nanosi)	225	μm
ukupna minimalna debljina filma	450	μm
zapljusnuta zona	600	μm

Bez obzira na kategoriju korozivnosti i kategoriju vode odnosno tla, generalno se može zaključiti da se sustavi premaza za zaštitu stupa vjetroturbine od korozije korišteni na moru mogu primijeniti i za zaštitu vjetroturbina na kopnu. Uglavnom se razlikuju prema debljini filma i u određenim slučajevima prema broju premaza. To je opravdano činjenicom da su se od samih početaka za zaštitu vjetroturbina koristili isključivo visoko kvalitetni proizvodi na bazi epoksi i poliuretan smole kao što je u većini slučajeva i danas.

8.3.3. Sustavi korozijske zaštite dijelova *off-shore* vjetroturbina

Na Slici 23., a prema opisu iz Tablice 17., prikazan je tipičan sustav zaštite od korozije glavnih dijelova *offshore* vjetroagregata. Svaki dio vjetroturbine zaštićen je uglavnom: primarnim slojem, međuslojem i završnim premazom.



Slika 23. Moderni sustav antikorozijske zaštite dijelova *offshore* vjetroturbine [2]

Tablica 17. Sustava zaštite *offshore* vjetroturbine (C5-M) prema Slici 23. [2]

	Zaštitni kit	Kemijsko podrijetlo	Boja	Nanošenje	Svojstva proizvoda	Primjena
1	EPOSURF (2K)	EPOXY	siva	nož za kit	vrlo čvrst epoxy kit za popravke; izvrsna svojstva brušenja i crtanja nakon sušenja; dostupan sa sporim i brzo stvrdnjavajućim učvršćivačem; izvrsno sušenje na zraku te izvrsno prijanjanje na kompozitne dijelove	kit za modeliranje visoke čvrstoće za zaglađivanje površina, nepravilnosti kontura i popravaka oštećenja u jednom koraku; lako brušenje nakon punog stvrdnjavanja
	Punjenje pora	Kemijsko podrijetlo	Boja	Nanošenje	Svojstva proizvoda	Primjena
2	POLYSURF (2K)	POLYESTER	siva	nož za kit	poliesterski kit visoke čvrstoće za lake popravke i završene površine; dobra svojstva za brzo brušenje i crtanje; stvrdnjavanje od 15 do 30 min; kompatibilan s bilo kojim dijelom podloge djelomično prekrivene s bojom	završni kit za popunjavanje rupica i ogrebotina; dobivanje homogene površine spremne za bojanje nakon finog sušenja
	Primarni sloj	Kemijsko podrijetlo	Boja	Nanošenje	Svojstva proizvoda	Primjena
3a	PRIAM CE 11	EPOXY	siva 7042	pneumatski zračna mješavina	izvrsna prionjivost na epoksi i poliesterskim podlogama djelomično prekrivenim s kitom ili punilom pora; zahtjeva pokrivenost s 2K PU završnim slojem	za postizanje dobre prionjivosti i glatke podloge prije bojanja
3b	PRIMADER HES S15	visoki čvrsti ACRYLIC PU	siva 7042	pneumatski zračna mješavina	akril-poliuretanska boja visoke čvrstoće; izvrsna svojstva prijanjanja i punjenja svih vrsta podloga; vrlo fleksibilna, izvrsna površina prije bojanja	za postizanje dobre prionjivosti i glatke podloge prije bojanja
	Anti erozijski završni premaz	Kemijsko podrijetlo	Boja	Nanošenje	Svojstva proizvoda	Primjena
4	PRIAM 32005 (2K)	POLYURETHAN E	bijela 9081 siva 7035	pneumatski zračna mješavina	poliuretanski završni premaz s izvrsnim erozijskim svojstvima i povezan s visokom UV otpornošću	za površine napadnih rubova posebna zaštita završnim slojem; učinkovita alternativa za LE-trake; za različite dijelove zrakoplova (lopaticе, mlaznice)

Tablica 17. (nastavak)

	Završni premaz	Kemijsko podrijetlo	Boja	Nanošenje	Svojstva proizvoda	Primjena
5	MADERLAQUE VHS (2K)	vrlo visoko čvrsti i debeloslojni ACRYLIC PU		bezračno	vrlo visoka čvrsta akril-poliuretanska boja visoke fleksibilnosti, izvrsne abrazijske otpornosti i UV zaštite	finalni završni premaz na debeloslojnom prajmeru ili epoxy međuslojem za osiguravanje izvrne konačne površinske zaštite
	Primarni sloj	Kemijsko podrijetlo	Boja	Nanošenje	Svojstva proizvoda	Primjena
6	ZINEPAL 1607 (2K)	cinkom obogaćen EPOXY premaz	crveno smeđi 3009	bezračno	niski udio otapala; iznimna korozijska otpornost zbog visoke koncentracije cinka koji omogućuje katodnu zaštitu	na ispjekarenim čeličnim površinama izloženim ekstremnim korozijskim uvjetima; za offshore i onshore konstrukcije
	Međusloj	Kemijsko podrijetlo	Boja	Nanošenje	Svojstva proizvoda	Primjena
7a	ETOKAT AKTIV (2K)	EPOXY	siva 7043	zračna mješavina pod pritiskom	niski udio otapala; dobra korozijska svojstva kao i prionjivost na epoxy primarni sloj	međusloj koji se nanosi na cinkom obogaćen epoxy primarni sloj
7b	ARKOTE 32 LV (2K)	debeloslojni EPOXY	siva 7043	zračna mješavina pod pritiskom	debeloslojna boja vrlo visoke čvrstoće; dobro prijanjanje i zaštita u nepovoljnim uvjetima; sušenje na zraku	debeloslojni posredni lejer koji se postavlja na cinkom obogaćeni EPOXY prajmer ili ispjekareni čelik za dugotrajnu korozijsku zaštitu
	Završni premaz	Kemijsko podrijetlo	Boja	Nanošenje	Svojstva proizvoda	Primjena
8a	MADERLAQUE VHS (2K)	vrlo visoko čvrsti i debeloslojni ACRYLIC PU	bijela 9018 siva 7035	bezračno	vrlo visoko čvrsta akril-poliuretanska boja; izvrsna fleksibilnost sloja, otpornost na ogrebotine te izvrsna UV zaštita	finalni završni premaz korišten na debeloslojnom prajmeru ili epoxy međusloju za osiguravanje izvrne konačne površinske zaštite
8b	MADERLAQUE ESX	debeloslojni EPOXY-SILOXANE		bezračno zračna mješavina	vrlo visoko čvrsti i debeloslojni monosloj; izvrsna korozijska zaštita, otpornost na habanje i sve vremenske uvjete	završni premaz koji se postavlja na primarni sloj ili direktno na čelik osiguravajući cjelokupnu zaštitu u jednom premazu

Tablica 17. (nastavak)

	Suzbijanje obrastanja	Kemijsko podrijetlo	Boja	Nanošenje	Svojstva proizvoda	Primjena
9	FOUL-PROTECT (trajni bakrom obogaćen)	EPOXY_POLY AMIDE (vodena baza)	crveno-smeđi 8023 crni 9005	zračna mješavina pod pritiskom	bakrom obogaćen metalni premaz (sprej) na bazi ETP bakra i organske matrice koji omogućava dugotrajnu zaštitu podloge od obrastanja	za uronjene čelične konstrukcije; povezan sa zinepal i arkote prajmerima koristi se u agresivnim vodenim sredinama i protiv korozije; smanjuje otpor uslijed strujanja fluida; otporan na zrak i postojan u vodi pri bilo kojoj temperaturi

9. EKSPERIMENTALNI DIO

9.1. Cilj i svrha eksperimentalnog istraživanja

Osim prikaza mogućih sustava premaza za *offshore* i *onshore* vjetroelektrane, u sklopu ovog diplomskog rada projektirani su sustavi premaza za korozijsku zaštitu čeličnih stupova offshore vjetroelektrana. Napravljena je usporedba premaza na bazi vode i, u praksi najčešće korištenih, klasičnih sustava premaza na bazi otapala te su prikazane njihove prednosti i nedostaci u svrhu zaštite čeličnih stupova vjetroelektrana. Projektirano je 5 sustava premaza na bazi vode te 5 klasičnih sustava premaza. Međutim, s obzirom na trajanje i složenost, ispitivanje je provedeno samo na jednom klasičnom sustavu premaza na bazi otapala i jednom sustavu premaza na bazi vodi te su oni uspoređeni. Na projektiranim sustavima premaza provedena su fizikalna, kemijska, elektrokemijska te mikrostrukturna ispitivanja. U sklopu fizikalnih svojstava određena je prionjivost premaza, njegova debljina, otpornost na udar, vlačna čvrstoća te su provedena ispitivanja u slanoj i vlažnoj komori kako bi se odredila korozijska zaštita premaza. Također, određena je mikrostruktura premaza i njihov kemijski sastav te je provedena elektrokemijska impedancijska spektroskopija (EIS) kako bi se odredio otpor premaza. Sva su ispitivanja provedena u Laboratoriju za zaštitu materijala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

9.2. Projektiranje sustava premaza

Prilikom projektiranja sustava premaza prvenstveno je potrebno odrediti kategoriju korozivnosti s obzirom da je struktura sustava premaza uvjetovana njome. Za potrebe ovog rada odabrana je kategorija korozivnosti C3 koja, prema Tablici 7., odgovara industrijskoj i urbanoj atmosferi s prosječnom razinom onečišćenja sumpornim dioksidom te priobalnim područjima niskog saliniteta. Kao bitan faktor navodi se vijek trajanja premaza. S obzirom da su projektirani sustavi namijenjeni korozijskoj zaštiti čeličnog stupa vjetroelektrane, očekivani vijek trajanja prema Tablici 10. je visok, odnosno više od 15 godina.

Na temelju EN ISO 12944, 5. dio (Tablica 11.), uz zadovoljavanje uvjeta trajnosti od 15 godina, projektirano je pet klasičnih sustava premaza i premaza na vodenoj bazi, različitih sastava i debljina. Unatoč tome što se u praksi najčešće koriste trokomponentni sustavi

premaza, moguća je primjena i dvokomponentnih. Iz prakse se kao donja granica, za uvjete kategorije korozivnosti C3, postavlja se 200 μm , što je uzeto u obzir prilikom formiranja sustava premaza (Tablica 18.).

Tablica 18. Projektirani sustavi premaza prema EN ISO 12944, 5. dio

Redni broj	Sustav premaza	Ukupna debljina premaza [μm]
1.	1K EPOXY temeljni premaz 160 μm 1K akrilni završni premaz 40 μm	200
2.	2K EPOXY Zn-rich temeljni premaz 80 μm 2K EPOXY međupremaz 100 μm 2K PUR završni premaz 60 μm	240
3.	2K EPOXY temeljni premaz 80 μm 2K EPOXY međupremaz 100 μm 2K PUR završni premaz 60 μm	240
4.	1K EPOXY Zn-rich temeljni premaz 40 μm 2K EPOXY međupremaz 100 μm 2K PUR završni premaz 60 μm	200
5.	1K EPOXY Zn-rich temeljni premaz 40 μm 2K PVC završni premaz 160 μm	200

*PUR- poliuretan, PVC- polivinilklorid

Kao najčešće korišteni klasični sustav premaza za koruzijsku zaštitu čeličnih stupova vjetroelektrana, u uvjetima korozivnosti C3, spominje se projektirani sustav zaštite 2 (označen žutom bojom) koji je i odabran kao sustav za daljnja ispitivanja. Projektirani sustavi premaza na bazi vode prikazani su u Tablici 19., gdje je odabrani sustav premaza na vodenoj bazi, za daljnja ispitivanja, označen žutom bojom.

Tablica 19. Projektirani sustavi premaza na bazi vode

Redni broj	Sustav premaza	Ukupna debljina premaza [μm]
1.	1K EPOXY WB 180 μm 1K PUR WB 60 μm	240
2.	2K EPOXY 180 μm 2K WB PUR 60 μm	240
3.	2K AKRIL WB 160 μm 1K AKRIL WB 40 μm	200
4.	2K EPOXY WB 160 μm 1K PUR WB 40 μm	200
5.	2K EPOXY 160 μm 2K PUR WB 60 μm	120

* WB- (eng. water based)- vodena baza

PUR- poliuretan

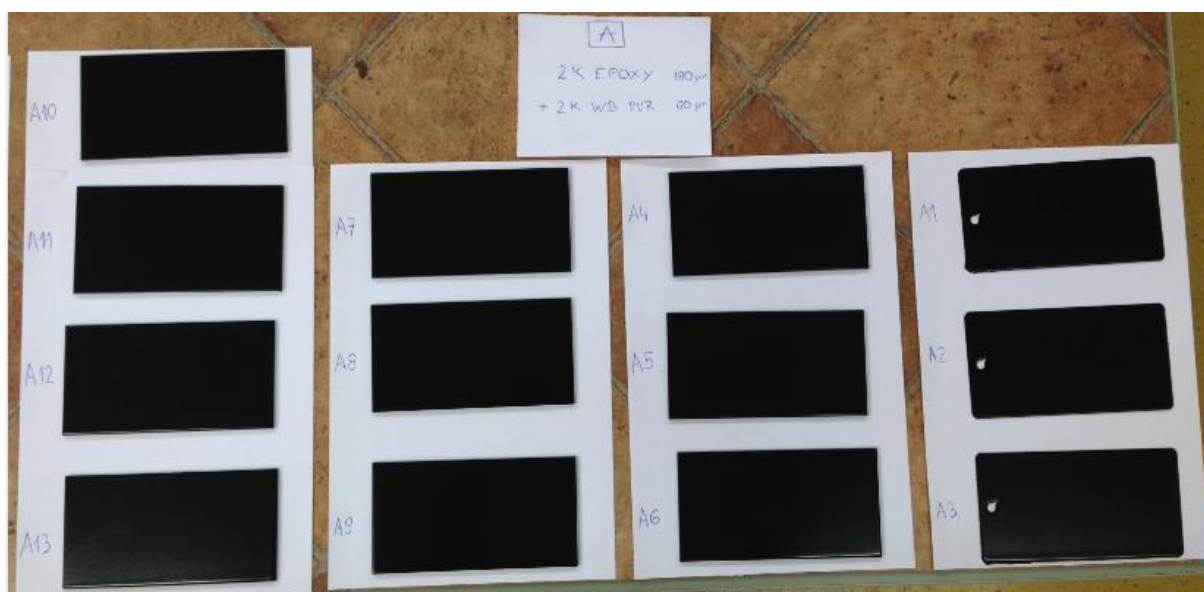
9.2. Odabrani sustavi premaza

Odabrana su dva sustava premaza, klasični trokomponentni sustav premaza te sustav premaza na bazi vode. U daljnjem razmatranju, sustav premaza na bazi vode biti će indeksiran sa sustav premaza A, dok će klasični trokomponentni sustav biti indeksiran kao sustav premaza B (Tablica 20.). Sustavi premaza nanesen su na uzorke izrađene od općeg konstrukcijskog čelika S235JRG2 (Č 0361). Uzorci s odabranim sustavima premaza, izrađeni su u tvrtki Helios TBLUS, d.o.o., Slovenija.

Tablica 20. Odabrani sustavi premaza za daljnja ispitivanja

A		B	
2K EPOXY	180 μm	2K EPOXY Zn-rich temeljni premaz	80 μm
2K WB PUR	60 μm	2K EPOXY međupremaz	100 μm
		2K PUR završni premaz	60 μm

Izrađeno je 13 uzoraka sustava premaza A, i 14 uzoraka sustava premaza B. Od svakog sustava premaza, nekoliko je uzorka pripremljeno za ispitivanje na udar (A1, A2, A3 i B1, B2, B3, B4). Radi lakšeg prepoznavanja, uzorci sustavi premaza A izrađeni su u crnoj boji, dok su uzorci sustava premaza B izrađeni u bijeloj boji. Uzorci sustava premaza A numerirani su brojevima od 1 do 13 (Slika 24.), a uzorci sustava premaza B brojevima 1 do 14 (Slika 25.).



Slika 24. Uzorci sustava premaza A, vodorazrjedivi



Slika 25. Uzorci sustava premaza B, na bazi otapala

9.3. Ispitivanje fizikalnih i kemijskih svojstava sustava premaza

U sklopu ispitivanja fizikalnih i kemijskih svojstava sustava premaza A i B provedeno je:

- mjerenje debljine suhog filma sustava premaza
- ispitivanje sjaja površina sustava premaza
- ispitivanje tvrdoće sustava premaza olovkama
- ispitivanje otpornosti sustava premaza na udar
- ispitivanje sustava premaza u vlažnoj komori
- ispitivanje sustava premaza u slanoj komori
- ispitivanje prionjivosti sustava premaza *crosscut* metodom
- ispitivanje vlačne čvrstoće sustava premaza *pulloff* metodom.

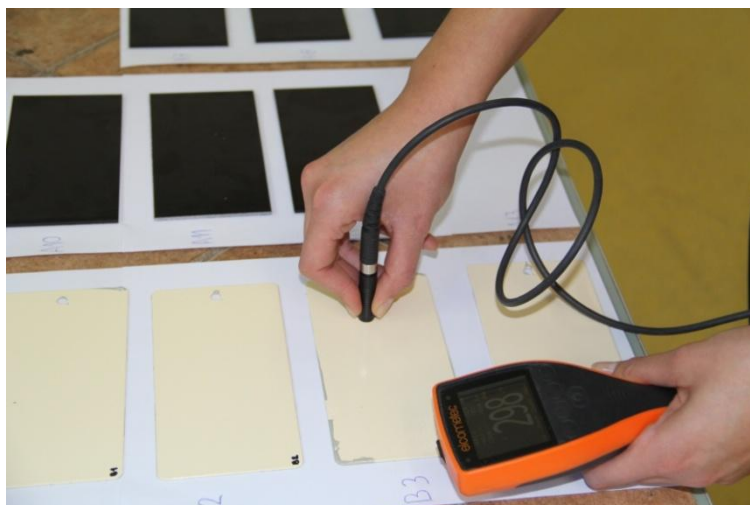
9.3.1. Mjerenje debljine suhog filma sustava premaza

U skladu s normom EN ISO 2808:2007, metodom vrtložnih struja, određena je debljina suhog filma uzoraka sustava premaza A i B. Ispitivanje je provedeno uređajem Elcometer 456, mjerač debljine suhog filma premaza (Slika 26.).



Slika 26. Elcometer 456, uređaj za određivanje debljine suhog filma premaza

Mjerenje je provedeno na svih 13 uzoraka sustava premaza A i 14 uzoraka sustava premaza B. Određivanje debljine suhog filma premaza, uz prethodno umjeravanje uređaja, provelo se prislanjanjem sonde okomito na površinu premaza te očitavanjem vrijednosti debljine s ekrana uređaja (Slika 27.).



Slika 27. Postupak mjerenja debljine suhog filma sustava premaza A i B

Na svakom je uzorku provedeno deset očitavanja, a odabrane su minimalne i maksimalne vrijednosti debljine premaza (Tablica 21.).

Tablica 21. Debljine suhog filma sustava premaza A i B

A			B		
	min [μm]	max [μm]		min [μm]	max [μm]
A1	262	277	B1	299	331
A2	265	285	B2	283	310
A3	251	279	B3	283	299
A4	218	257	B4	309	339
A5	205	252	B5	304	355
A6	203	248	B6	264	294
A7	214	267	B7	280	300
A8	214	256	B8	284	326
A9	210	242	B9	275	293
A10	228	284	B10	267	290
A11	210	257	B11	275	293
A12	228	269	B12	272	305
A13	200	252	B13	261	278
			B14	266	285

Iz Tablice 21. može se zaključiti da su, kako minimalne, tako i maksimalne vrijednosti debljine suhog filma sustava premaza A manje u odnosu na sustav premaza B. Dok se maksimalne debljine sustava premaza A kreću oko 260 μm , kod sustava premaza B one prelaze čak i 300 μm .

9.3.2. Ispitivanje sjaja površine sustava premaza

U skladu s normom EN ISO 2813: 1978, primjenom TQC POLYGLOSS uređaja (Slika 28.), uz prethodno umjeravanje na crnom tijelu, za mjerenje sjaja površine, određen je stupanj sjaja površina sustava premaza A i B. Mjerenje se vrši okomitim postavljanjem uređaja na površinu premaza te očitavanjem vrijednosti. Kategorija sjaja površine određuje se projiciranjem svjetla, pod određenim kutom, na površinu premaza i mjerenjem reflektiranog svjetla. Svjetlo se projicira pod kutovima od 20°, 60° i 85°. Kao referentni kut uzima se kut od 60°, projiciranje pod kutom od 20° daje najbolje rezultate na visoko-sjajnim površinama, dok projiciranje pod kutom od 85° najbolje odgovara za matirane površine.



Slika 28. Uređaj za određivanje kategorije sjaja površina sustava premaza

Izvršeno je po tri mjerenja na sustavima premaza uzoraka A10 i B6, uz pretpostavku da kategorija sjaja ostalih uzoraka korespondira s navedenima. U Tablici 22., prema Marine Coatings Manual, a u skladu s ISO 2813, prikazane su kategorije sjaja, za projicirani kut od 60°, koje korespondiraju s očitanjima na uređaju [25]. Na temelju tih podataka određena je kategorija sjaja za sustave premaza uzoraka A10 i B6 (Tablica 23.).

Tablica 22. Kategorije sjaja prema Marine Coatings Manual, u skladu s ISO 2813 [25]

KATEGORIJA SJAJA	VRIJEDNOST
Ravna površina	0 - 10 %
Ljuska jajeta	10 - 20 %
Polu-sjajna	20 - 45 %
Sjajna	45 - 75 %
Visoko-sjajna	75 - 100 %

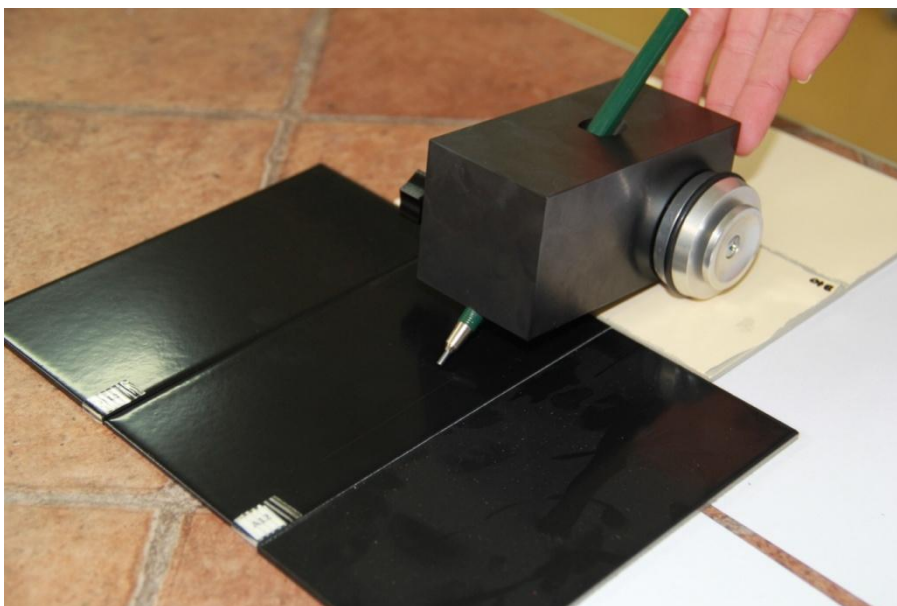
Tablica 23. Kategorije sjaja za sustave premaza A i B

	BROJ MJERENJA	PROJICIRANI KUT	OČITANI IZNOS [GU]	KATEGORIJA SJAJA PREMAZA PREMA ISO 2813 ZA KUT OD 60°
A10	1	20°	23,7	SJAjna POVRŠINA
		60°	57,1	
		85°	83,7	
	2	20°	23,2	SJAjna POVRŠINA
		60°	56,5	
		85°	68,3	
	3	20°	22	SJAjna POVRŠINA
		60°	57,6	
		85°	80,4	
B6	1	20°	24,9	SJAjna POVRŠINA
		60°	67,6	
		85°	67,7	
	2	20°	25,8	SJAjna POVRŠINA
		60°	69,1	
		85°	63,8	
	3	20°	26,2	SJAjna POVRŠINA
		60°	68,6	
		85°	67,9	

Na temelju očitanih podataka zaključuje se kako oba sustava premaza imaju sjajne površine.

9.3.3. Ispitivanje tvrdoće sustava premaza

Tvrdoća sustava premaza uzoraka A i B ispitivala se metodom olovaka, u skladu s normom EN ISO 15184:1998. Metoda se temelji na ostavljanju traga olovaka, različite tvrdoće, na premazu. Ispitivanje se vrši sve dok olovke, različitih tvrdoća, ostavljaju tragove. Prvi puta kada olovka ne ostavi trag, tvrdoća te olovke označit će tvrdoću samog premaza. Oprema za mjerenje tvrdoće sastoji se od elementa Simex (Slika 29.) koji fiksira olovku pod kutom od 45° te 14 olovaka različitih debljina, gdje su olovke od 3B do 9B meke, od 2B do 2H srednje, a od 3H do 9H tvrde (Slika 30.).



Slika 29. Postupak određivanja tvrdoće premaza metodom olovaka



Slika 30. Olovke različitih tvrdoća za ispitivanje tvrdoće premaza

Ispitivanje tvrdoće provedeno je na sustavima premaza uzoraka A12 i B10 (Slika 31.). Mjerenje je, kod oba uzorka, započeto olovkom tvrdoće 3H i nastavilo se prema mekšim (tvrdoća B) olovkama (3H-2H-H-HB-B-2B-3B-4B). Dobivene tvrdoće ispitivanih uzoraka, odgovaraju i tvrdoćama na preostalim uzorcima iz skupine A, odnosno B (Slika 31.).



Slika 31. Provedeno ispitivanje tvrdoće olovkama na uzorcima A12 i B10

Na temelju provedenog ispitivanja, može se zaključiti da su sustavi premaza uzoraka A (sustavi premaza na vodenoj bazi) srednje meki premazi, u odnosu na sustave premaza uzoraka B (klasični trokomponentni sustavi premaza) koji spadaju u meke premaze (Tablica 24.).

Tablica 24. Izmjerene tvrdoće sustava premaza A i B

Uzorak	Tvrdoća
A12	B
B10	4B

9.3.4. Ispitivanje otpornosti sustava premaza na udar

Ispitivanje otpornosti sustava premaza na udar provodi se u skladu s normom EN ISO 6272-2: 2002, a provodi se padom utega, težine 1 kg, s određene visine na uzorak (Slika 32.). Tada je otpornost na udar ekvivalentna visini s koje je pao uteg. Utteg pada, s različitih visina, sve dok udarac utega prestane uzrokovati oštećenja i pukotine na uzorku. Upravo ta visina, na kojoj nije došlo do oštećenja premaza, označava otpornost premaza na udar.



Slika 32. Uteg za utvrđivanje otpornosti premaza na udar s postavljenim uzorkom

Početak ispitivanja započinje na određenoj visini koju kod svakog sljedećeg udarca smanjujemo. Kada na nekoj visini više nema vidljivih oštećenja, potrebno je ponoviti mjerenje na visini neznatno iznad prethodne kako bi sa sigurnošću znali koja je visina. Za potrebe ovog diplomskog rada, ispitivanje je započeto na visini od 50 cm, i smanjivalo se po 10 cm. Kada više nisu bila prisutna oštećenja, uteg bi se vratio 5 cm više i mjerenje se ponovilo. Ispitivanje se provelo, kako na sustavu premaza uzoraka A, tako i na sustavu premaza uzoraka B, i to na uzorcima A2 i B2 (Slika 33.).



Slika 33. Uzorci A2 i B1 podvrgnuti ispitivanju otpornosti na udar

Promatranjem rezultata ispitivanja na udar, iz Tablice 25., da se zaključiti da su oba uzorka podjednako otporna na udar, uz nešto veću otpornost uzorka A.

Tablica 25. Otpornost na udar sustava premaza A i B

Uzorak	Otpornost na udar (visina ispuštanja utega)
A2	40 cm
B1	35 cm

9.3.5. Ispitivanje u vlažnoj komori

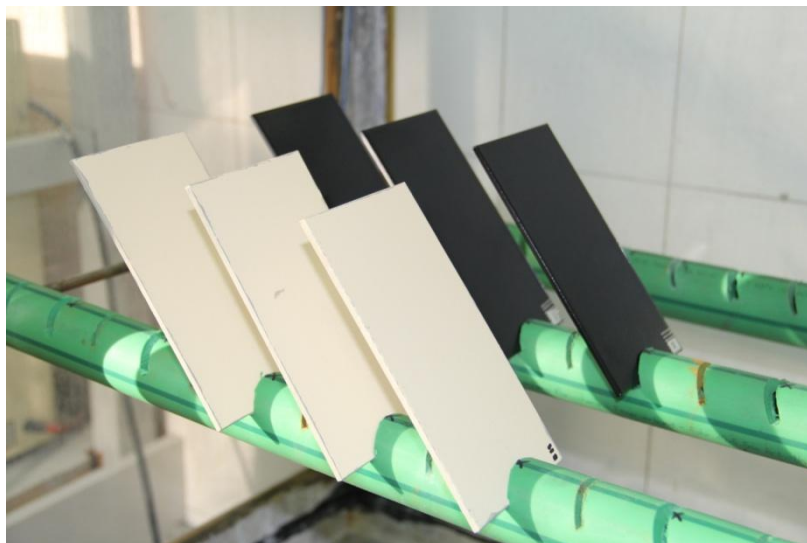
U skladu s normom DIN EN ISO 6270-2 provedeno je ispitivanje uzoraka u vlažnoj komori s ciljem utvrđivanja kontrole kvalitete antikorozivne zaštite sustava premaza A i B u vlažnim uvjetima. Uzorci su bili postavljeni u zatvorenu, vlažnu komoru (Slika 34.) zagrijane i zasićene smjese zraka i vodene pare, gdje je temperatura uglavnom oko $38 (\pm 2) ^\circ\text{C}$. Komora je opremljena posudom za prihvatanje vode ispod koje se nalazi grijač koji omogućava kontinuirano isparavanje te kondenzaciju na površini uzorka. U uvjetima 100 %-tne relativne vlažnosti, uslijed male temperaturne razlike uzoraka i pare, dolazi do pojave kondenzacije na površini uzoraka.



Slika 34. Vlažna komora

Uvjeti izlaganja određeni su odabirom trajanja ispitivanja u vlažnoj komori. U skladu s HRN EN ISO 6270-2, za kategoriju korozivnosti C3-srednja, određeno je provođenje ispitivanja u vlažnoj komori u trajanju od 5 dana (120 sati). Za potrebe ispitivanja odabrano je po tri

uzorka sustava premaza A i tri uzorka sustava premaza B (Slika 35). Uzorci svake skupine su grupirani prema najbližim debljinama suhog sloja premaza. Uzorci se postavljaju u komoru pod kutom od 15° , s razmakom oko 30 mm, kako kondenzat jednog uzorka ne bi došao u kontakt s drugim. Iz skupine uzoraka sustava premaza A, ispitivanju u vlažnoj komori podvrgnuti su uzorci A11, A8 i A4, dok su iz skupine uzoraka sustava premaza B ispitivani uzorci B11, B9 i B7.




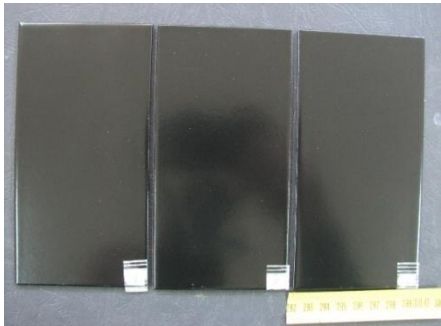

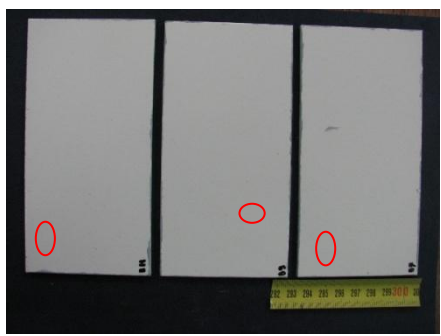
Slika 35. Uzorci sustava premaza A i B prije ispitivanja u vlažnoj komori

Utjecaj vode na premaze ovisi o karakteristikama samih premaza. Svaka promjena boje premaza, pojava mjehura, smanjenje prionjivosti, omekšavanje ili pojava krhkosti označavaju da premaz loše podnosi dugotrajni kontakt s vodom, odnosno da je sklon pojavi korozije i korozijskih produkata.

Nakon petodnevnog ispitivanja u vlažnoj komori, uzorci su izvađeni iz komore, te su neposredno nakon vađenja (nakon 5 do 10 minuta), promatrane promjene na površini premaza. Promatranje je izvršeno u kratkom periodu s obzirom da se utjecaj izloženosti vodi mijenja nakon kratkog vremena. Uzorci su nakon izlaganja u vlažnoj komori, ocijenjeni u skladu s normom ISO 4628-2:2003. Norma određuje razinu oštećenosti premaza, veličinu i količinu oštećenja kao i intenzitet ujednačenih promjena na premazima.

U Tablici 26. prikazana je usporedba uzoraka prije te neposredno nakon izlaganja vlažnoj atmosferi.

Tablica 26. Rezultati ispitivanja u vlažnoj komori sustava premaza A i B

	PRIJE ISPITIVANJA U VLAŽNOJ KOMORI	NAKON ISPITIVANJA U VLAŽNOJ KOMORI (120 h)
A		
B		

Vizualnim pregledom površina uzoraka nakon ispitivanja u vlažnoj komori, zaključeno je da na uzorcima sustava premaza A nisu primijećene nikakve promjene u izgledu, tj. nije došlo do korozijskog razaranja premaza (nema pojave bubrenja, pucanja, ljuštenja). S druge strane, na svakom od uzoraka sustava premaza B, nakon izlaganja vlažnoj komori, došlo je do pojave bubrenja (označeno crveno u Tablici 26.). Pojava mjehura na uzorcima je rijetka i mjestimična, a prema normi ISO 4628-2:2003, premaz je ocijenjen s ocjenom D2-S2. Ispitivanjem u vlažnoj komori pokazalo se da sustav premaza A (sustav premaza na vodenoj bazi), za zaštitu ugljičnog čelika, bolje podnosi izloženost vlažnoj i toploj atmosferi.

24 sata nakon što su uzorci izvađeni iz vlažne komore, podvrgnuti su ispitivanju prionjivosti premaza crosscut i pulloff metodama kako bi se usporedili s ispitanim etalonskim uzorkom. Ispitivanje prionjivosti detaljno je prikazano u Poglavljima 9.3.7. i 9.3.8.

9.3.6. Ispitivanje u slanoj komori

Ispitivanje u slanoj komori provedeno je sukladno normi HRN EN ISO 9227:2006 s ciljem utvrđivanja otpornosti uzoraka na pojavu korozivnih produkata i korozije. Uzorci su bili postavljeni u kontrolirane uvjete unutar Ascott S450 slane komore (Slika 36.). Ispitivanje se provodilo u 5 %-tnoj NaCl otopini, dok je temperatura unutar komore iznosila 35 °C. Unutar komore, uzorci su bili izloženi slanoj vodi koju raspršuje zrak.



Slika 36. Ascott S450 slana komora

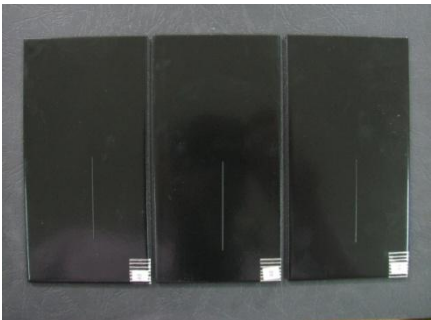

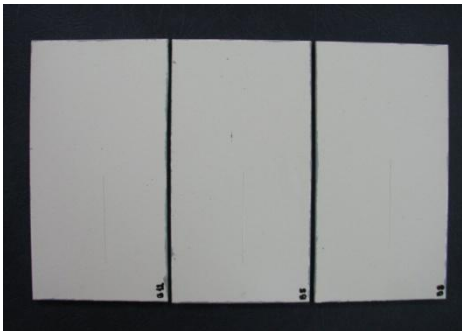

U skladu s HRN EN ISO 7253, za uvjete korozivnosti C3-srednje, određeno je ispitivanje uzoraka u slanoj komori u trajanju od 10 dana (240 sati). Kao i za potrebe ispitivanja u vlažnoj komori, tako je i ovdje odabrano tri uzorka skupine A i tri uzorka skupine sustava premaza B (Slika 37.), koji su također, grupirani prema sličnim debljinama suhog filma premaza. Iz skupine uzoraka sustava premaza A, ispitivanju u slanoj komori podvrgnuti su uzorci A9, A6 i A5, a od skupine premaza B, uzorci B12, B8 i B5. Uzorci su, u komori, postavljeni tako da premaz gleda prema gore kako bi direktno bio izložen slanoj magli. I ovdje su uzorci postavljeni dovoljno daleko jedan od drugoga kako ne bi imali međusobni kontakt.



Slika 37. Uzorci sustava premaza A i B prije ispitivanja u slanoj komori

Na sve su uzorke, sukladno normi HRN EN ISO 7253, urezani urezi koji ubrzavaju proces nastanka korozije. Utjecaj izloženosti slanoj atmosferi određen je stupnjem pojave korozije i korozijskih oštećenja poput mjehuranja ili bubrenja. Svaka od ovih pojava označit će lošu postojanost premaza u slanoj atmosferi. Nakon desetodnevnog ispitivanja u slanoj komori, uzorci su izvađeni te su promatrane eventualne nastale promjene na površini premaza. U Tablici 27. je prikazana usporedba uzoraka sustava premaza A i B prije i nakon izlaganja slanoj komori.

Tablica 27. Rezultati ispitivanja u slanoj komori sustava premaza A i B

	PRIJE ISPITIVANJA U SLANOJ KOMORI	NAKON ISPITIVANJA U SLANOJ KOMORI (240 h)
A		
B		

Nakon ispitivanja u slanoj komori, na uzorcima sustava premaza B uočena je pojava mjestimičnih mjehura, što označava lošu prionjivost premaza. Prema normi ISO 4628-2:2003, sustavi premazi B ocijenjeni su ocjenom D2-S2. Sustav premaza A, niti na jednom uzorku, nije pokazao nikakve promjene nakon izlaganja slanoj komori. Analizom rezultata ispitivanja u slanoj komori, pokazalo se da sustavi na bazi vode (A), u odnosu na sustave na bazi otapala (B) znatno bolje podnose izloženost slanoj atmosferi bez pojava mjehuranja, pucanja ili korozije.

Također, i nakon ispitivanja u slanoj komori, uzorci su ponovno podvrgnuti ispitivanju prionjivosti premaza *crosscut* i *pulloff* metodama, detaljnije prikazanim u poglavljima 9.3.7. i 9.3.8.

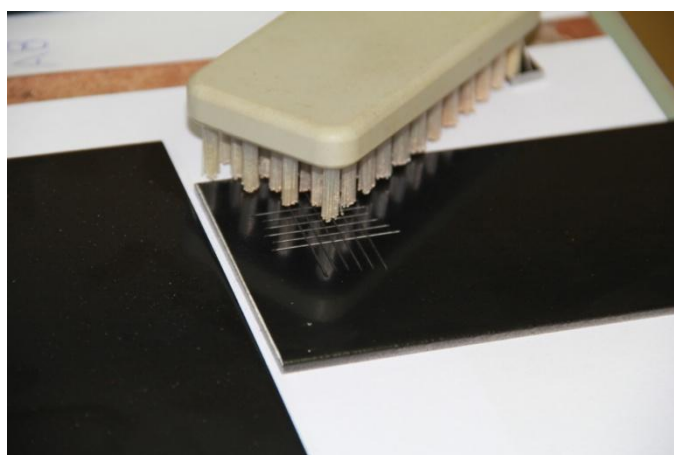
9.3.7. Ispitivanje prionjivosti premaza

Ispitivanje prionjivosti premaza provodilo se metodom mrežice tzv. *crosscut* testom, sukladno normi HRN EN ISO 2409:2007. Proces ispitivanja prionjivosti premaza započinje kreiranjem kvadratne mrežice urezivanjem zareza, u horizontalnom i vertikalnom smjeru, na premazu. Mrežica se kreirala pomoću metalne šablone sa prorezima, razmaknutim po 1 mm (prema HRN EN ISO 2409:2007, za metale). Urezano je 6 horizontalnih i 6 vertikalnih rezova kako bi se dobilo 25 polja (Slika 38.).

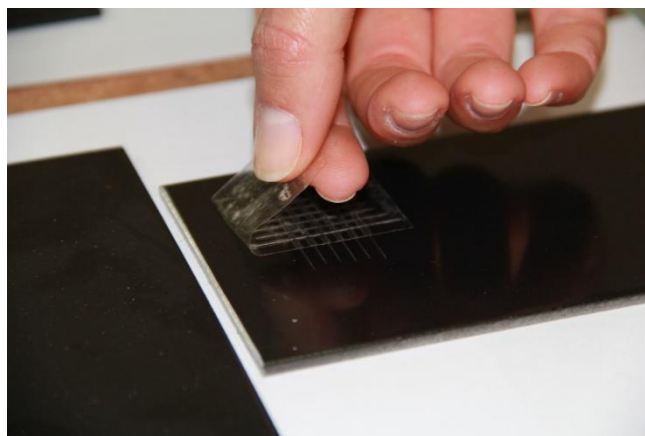


Slika 38. Urezivanje kvadratne mreže

Nakon urezivanja, površina ispitnih uzoraka je očišćena, za to predviđenom, četkicom (Slika 39.). Zatim se, na urezanu kvadratnu mrežicu zalijepila samoljepljiva traka koja se uklonila kratkim potezom pod kutom od 60° (Slika 40.), nakon čega se određuje stupanj prljanjanja premaza na podlogu.



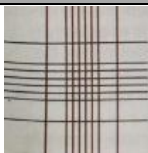
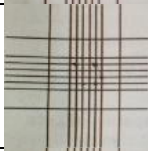
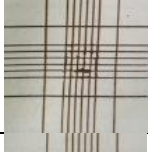
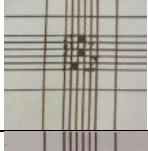


Slika 39. Čišćenje kvadratne mrežice četkicom



Slika 40. Uklanjanje samoljepljive trake s kvadratne mrežice


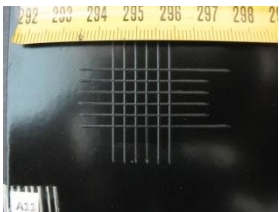
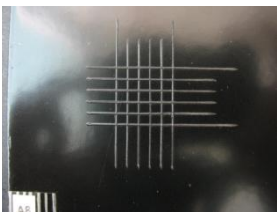
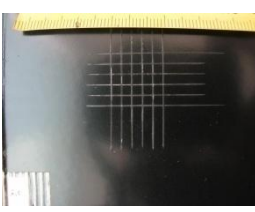
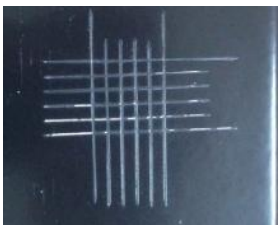

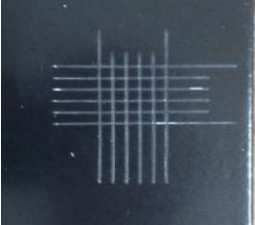
Uklanjanjem samoljepljive trake, promatrana je količina odvojenosti prevlake od podloge. Upravo postotak odvojenosti prevlake od podloge ocjenjuje jačinu priranja. Prionjivost premaza ocijenjena je prema normi HRN EN ISO 2409, ovisno o postotku oštećenja, i to ocjenama od 0 do 5 (Tablica 28.).

Tablica 28. Ocjena prionjivosti premaza prema normi HRN EN ISO 2409

Ocjena prionjivosti	Opis	Slika
0	Potpuno glatki tragovi rezova, nema oštećenja niti jednog kvadratića mrežice	
1	Nešto manja oštećenja premaza na sjecištima rezova; manje od 4% površine oštećeno	
2	Oštećenja duž rubova i na sjecištima rezova; 4 do 30 % površine oštećeno	
3	Oljuštenje premaza duž rubova i unutar kvadratića mrežice; 30 do 50 % površine oštećeno	
4	Oljuštenja duž rubova cijelog reza, neki kvadratići potpuno oljušteni; 50 do 60 % površine oštećeno	
5	Svako oštećenje koje se ne može klasificirati ocjenom 4	

Prionjivost neoštećene i, raznim uvjetima, neizložene podloge, ispitana je samo na etalonskim uzorcima A13 i B14 kako bi se utvrdilo početno stanje prevlake. Uzorcima A11, A8, A4 i B11, B9, B7 (izloženi vlažnoj komori) te uzorci A9, A6, A5 i B12, B8, B5 (izloženi slanoj komori) ispitana je prionjivost nakon izlaganja vlažnoj i slanoj atmosferi (Poglavlje 9.3.5. i 9.3.6.). Usporedba uzoraka sustava premaza A, nakon njihovog izlaganja u vlažnoj komori (A11, A8, A4) i slanoj komori (A9, A6, A5) s etalonskim uzorkom, iste skupine, prikazana je u Tablici 29.

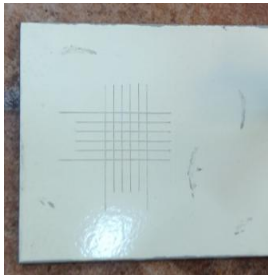
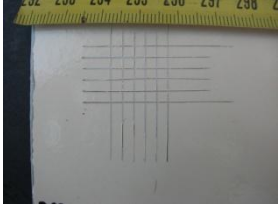
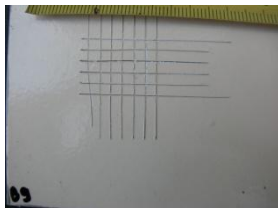
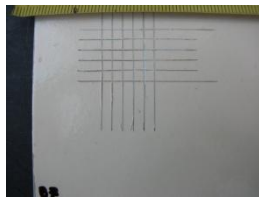
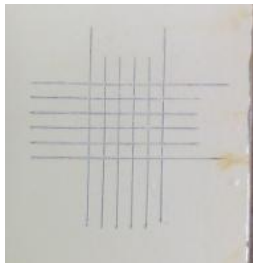
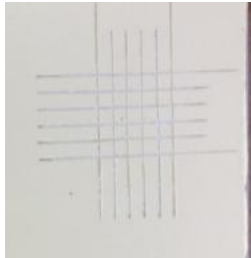
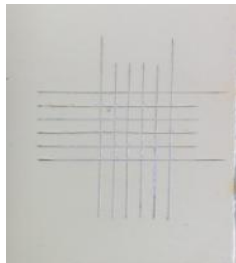
Tablica 29. Rezultati *crosscut* testa sustava premaza A

	SUSTAVI PREMAZA A			OCJENA PRIONJIVOSTI		
Etalonski uzorak A13				0		
Uzorci iz vlažne komore	A11	A8	A4	A11	A8	A4
				0	0	0
Uzorci iz slane komore	A9	A6	A5	A9	A6	A5
				0	0	0

Kao što pokazuje Tablica 29., provođenjem *crosscut* testa na etalonskom uzorku nisu nastala nikakva oštećenja na premazu. Nakon ispitivanja uzoraka u vlažnoj i slanoj komori, prionjivost uzoraka je ostala nepromijenjena, svi su uzorci pokazali zadovoljavajuću prionjivost.

Tablica 30. prikazuje usporedbu uzoraka sustava premaza skupine B prije i nakon izlaganja u vlažnoj (B11, B9, B7) i slanoj komori (B12, B8, B5) s etalonskim uzorkom te skupine.

Tablica 30. Rezultati *crosscut* testa sustava premaza B

	SUSTAVI PREMAZA B			OCJENA PRIONJIVOSTI		
Etalonski uzorak B14				0		
Uzorci iz vlažne komore	B11	B9	B7	B11	B9	B7
				0	0	0
Uzorci iz slane komore	B12	B8	B5	B12	B8	B5
				1	1	1

Provođenjem ispitivanja prionjivosti na etalonskom uzorku skupine premaza B da se zaključiti da niti ovdje ne postoje oštećenja premaza te je prionjivost ocijenjena nulom. Kao i kod uzorka skupine premaza A, uzorci skupine premaza B, nakon vlažne komore, pokazuju zadovoljavajuću prionjivost. Sustav premaza B, nakon ispitivanja u slanoj komori, pokazuje nastanak manjih oštećenja (zahvaćeno manje od 4 % ispitane površine) na sjecištima rezova.

Valja naglasiti kako su sustavi premaza A i B, nakon izlaganja vlažnoj atmosferi pokazali izvrsnu korozivnu postojanost te da zadovoljavaju uvjete prema standardu ISO 12944 (kategorija korozivnosti C3 uz visoku trajnost sustava). S druge strane, pokazalo se da veću otpornost na slanu atmosferu imaju sustavi premaza na bazi vode (A) u odnosu na sustave

premaza na bazi otapala kod kojih je došlo do promjene u prionjivosti premaza nakon izlaganja u slanoj komori.

9.3.8. Ispitivanje svojstava adhezije i kohezije







Ispitivanje prionjivosti premaza, tzv. *pulloff* testom, u skladu s normom EN ISO 4624:2002, temelji se na ispitivanju čvrstoće prijanjanja, odnosno na mjerenju vlačne čvrstoće premaza. Mjerenje je provedeno uređajem Elcometer 108, hidraulički mjerač prionjivosti, a koji se sastoji od kontrolnog žiga s ravnom površinom od nehrđajućeg čelika, ljepila za pričvršćenje kontrolnog žiga na premaz te uređaja za očitavanje vlačne čvrstoće (Slika 41.).



Slika 41. Oprema za provođenje pulloff testa, Elcometer 108

Prije provođenja ispitivanja, dio površine premaza treba biti očišćen i ravan kako bi se ljepilo uspješno i ravnomjerno rasporedilo po podlozi, a testiranje bilo uspješno. Bitno je naglasiti da se kao uspješno provedeno mjerenje smatra ono mjerenje kada premaz, nakon odvajanja kontrolnog žiga od podloge, prekrije barem 50 % površine kontrolnog žiga. U suprotnom je potrebno ponoviti ispitivanje na drugom dijelu površine (Tablica 31.).

Tablica 31. Redoslijed radnji prilikom provođenja pull-off metode

	
<p>Ravnomjerno nanošenje ljepila na površinu kontrolnog žiga</p>	<p>Prianjanje žiga okomito na podlogu ravnomjernim pritiskom</p>
	
<p>Radi uspješnosti testa, zalijepljene žigove potrebno je ostaviti cca. 24 h prije provođenja pull-off testa</p>	<p>Prije mjerenja, radi lakšeg održavanja opreme, svrdlom je potrebno počistiti višak ljepila unutar žiga</p>
	
<p>Zatezanjem ručice na uređaju povećava se pritisak zatika kroz sredinu žiga, koju stvara hidraulički klip; tlak na površini žiga i tlak u provrtu su tada isti</p>	<p>Očitavanje maksimalne vrijednosti vlačne čvrstoće na ekranu (prema NORSOK Standardu M-501, minimalna zahtijevana adhezija premaznih sustava iznosi 5 MPa)</p>

U skladu s EN ISO 4624, rezultati *pulloff* ispitivanja se klasificiraju oznakama A, A/B, B, B/C, n, n/m, -/Y, Y, Y/Z ovisno o mjestu gdje je došlo do adhezije, odnosno kohezije (Tablica 32.).

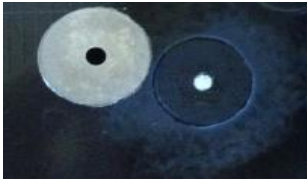


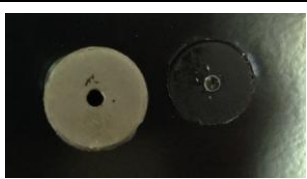



Tablica 32. Klasifikacija rezultata pulloff ispitivanja u skladu s EN ISO 4624 [26]

Ocjena ispitivanja	Opis
A	kohezija podloge
A/B	adhezija između podloge i temeljnog sloja
B	kohezija temeljnog sloja
B/C	adhezija između prvog i drugog premaza
n	kohezija n-tog premaza
n/m	adhezija između n i m sloja premaza
-/Y	adhezija između završnog sloja i ljepila
Y	kohezija u ljepilu
Y/Z	adhezija između ljepila i kontrolnog žiga

Vlačna čvrstoća neoštećene i neizložene prevlake ispitana je samo na etalonskim uzorcima A13 i B14 radi utvrđivanja početnog stanja. Uzorcima, koji su bili podvrgnuti ispitivanju u vlažnoj i slanoj komori, nakon toga je ispitana i vlačna čvrstoća. Vlačna čvrstoća, nakon vlažne komore, ispitana je uzorcima A11, A8, A4 i B11, B9, B7, a nakon slane komore uzorcima A9, A6, A5 i B12, B8, B5.

U Tablici 33. su prikazani rezultati *pulloff* testa etalonskog uzorka i uzoraka nakon vlažne (A11, A8, A4) i slane (A9, A6, A5) komore sustava premaza A.

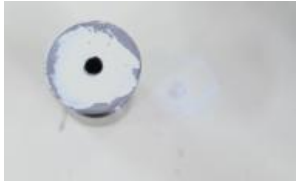

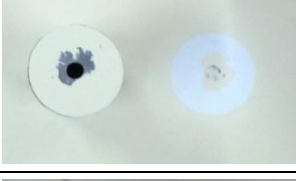
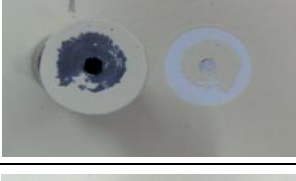
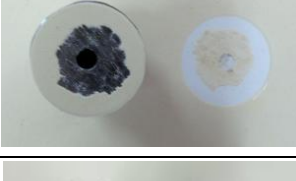


Tablica 33. Rezultati *pulloff* testa sustava premaza A

	UZORAK		REZULTAT
	Oznaka	Slika	
Etalonski uzorak	A13		<ul style="list-style-type: none"> ➤ 6,07 MPa ➤ 100 % Y/Z
Uzorci iz vlažne komore	A11		<ul style="list-style-type: none"> ➤ 8,57 MPa ➤ 100 % Y/Z
	A8		<ul style="list-style-type: none"> ➤ 11,91 MPa ➤ 95 % Y/Z ➤ 5 % -/Y
	A4		<ul style="list-style-type: none"> ➤ 11,43 MPa ➤ 97 % Y/Z ➤ 3 % -/Y
Uzorci iz slane komore	A9		<ul style="list-style-type: none"> ➤ 12,05 MPa ➤ 95 % Y/Z ➤ 5 % -/Y
	A6		<ul style="list-style-type: none"> ➤ 5,62 MPa ➤ 100 % Y/Z
	A5		<ul style="list-style-type: none"> ➤ 9,14 MPa ➤ 100 % Y/Z

Nakon ispitivanja uzoraka u vlažnoj i slanoj komori, svi su uzorci zadovoljili uvjet minimalne zahtijevane kohezije od 5 MPa, na temelju čega se zaključuje da sustav premaza A dobro podnosi kondenzaciju vode, izlaganje agresivnim otopinama i povišenu temperaturu.

Tablica 34. prikazuje rezultate pulloff testa etalonskog uzorka i uzoraka sustava premaza B nakon ispitivanja u vlažnoj (B11, B9, B7) i slanoj (B12, B8, B5).

Tablica 34. Rezultati pulloff testa sustava premaza B

	UZORAK		REZULTAT
	Oznaka	Slika	
Etalonski uzorak	B14		<ul style="list-style-type: none"> ➤ 9,04MPa ➤ 80 % -/Y ➤ 20 % Y/Z
Uzorci iz vlažne komore	B11		<ul style="list-style-type: none"> ➤ 6,06 MPa ➤ 80 % B/C ➤ 10 % Y/Z
	B9		<ul style="list-style-type: none"> ➤ 4,70 MPa ➤ 80 % B/C ➤ 10 % Y/Z
	B7		<ul style="list-style-type: none"> ➤ 3,09 MPa ➤ 60 % B/C ➤ 40 % Y/Z
Uzorci iz slane komore	B12		<ul style="list-style-type: none"> ➤ 4,46 MPa ➤ 60 % B/C ➤ 40 % Y/Z
	B8		<ul style="list-style-type: none"> ➤ 8,03 MPa ➤ 80 % B/C ➤ 20 % Y/Z
	B5		<ul style="list-style-type: none"> ➤ 5,44 MPa ➤ 60 % B/C ➤ 40 % Y/Z

Ispitivanjem prionjivosti, sustava premaza B, nakon ispitivanja u vlažnoj komori, samo je uzorak B1 uspio zadovoljiti uvjet minimalne vlačne čvrstoće od 5 MPa prema NORSOK Standardu M-501. Svi ostali uzorci sustava premaza B su pokazali znatno odvajanje završnog premaza čime se zaključuje da nisu postojani u vlažnoj i toploj atmosferi. S druge strane, nakon ispitivanja u slanoj komori, premazi su ocijenjeni prolaznom ocjenom s obzirom da su dva, od tri uzorka, zadovoljila minimalnu zahtijevanu adheziju premaznih sustava od 5 MPa.

Ako usporedimo sustave premaza A i B, nakon ispitivanja prionjivosti *pulloff* testom, može se zaključiti da je sustav premaza A pokazao bolju otpornost djelovanju agresivnih medija. Radi se o boljoj prionjivosti sustava premaza A nakon izlaganja vlažnoj i slanoj atmosferi.

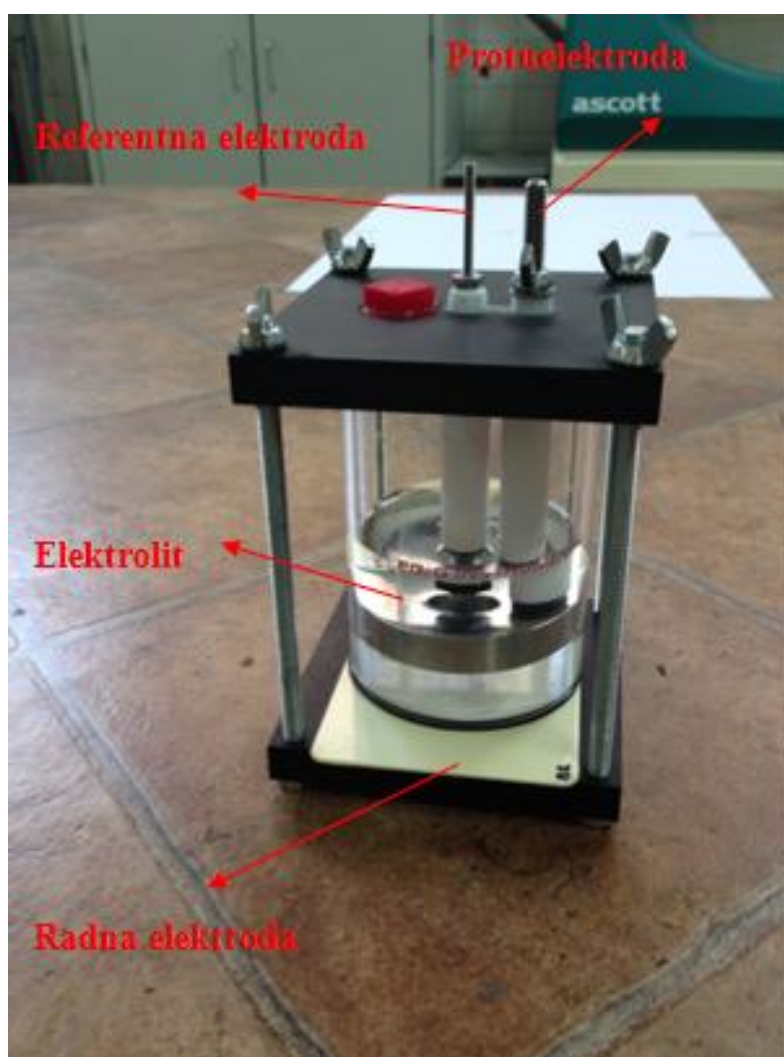
9.4. Ispitivanje elektrokemijskih svojstava

Kako je korozija u vodenom okruženju uvijek elektrokemijskog karaktera i odvija se po principu galvanskog članka, u sklopu eksperimentalnog dijela ovog rada ispitana su i elektrokemijska svojstva sustava premaza A i B, elektrokemijskom impedancijskom spektroskopijom (EIS). Elektrokemijskom impedancijskom spektroskopijom određen je korozijski potencijal i razlika otpora sustava premaza A i B. Mjerenje se provodilo na višenamjenskom potenciostat/galvanostatu VersaSTAT 3 uz primjenu software-a VersaStudio (Slika 42.).



Slika 42. Uređaj za elektrokemijsku impedancijsku spektroskopiju

Oprema za ispitivanje se sastoji od elektroničkog uređaja za ispitivanje, računala za očitavanje podataka te ispitne ćelije (Slika 43.). Ispitna ćelija opremljena je elektrodama, a ispunjena je elektrolitom kojem je izložena površina uzorka. Elektrolit je 3,5 %-tna otopina NaCl, a sam uzorak predstavlja radnu elektrodu. Referentna elektroda je elektroda poznatog potencijala, koja mjeri potencijal radne elektrode. Kao referentna elektroda koristila se elektroda izrađena od materijala oznake Hastalloy C276 čiji je potencijal +0,223 V u odnosu na vodikovu elektrodu. Protuelektroda, u strujnom krugu, je također od materijala oznake Hastalloy C276.







Slika 43. Ispitna ćelija

Elektrokemijskom ispitivanju podvrgnuti su uzorci A1 i B2, u 3,5 %-tnoj otopini NaCl bili su izloženi 72 sata kako bi se odredio otpor premaza nakon izlaganja agresivnoj otopini. U Tablici 35. su prikazani uzorci A1 i B2 prije i nakon 72 sata izlaganja 3,5 %-tnoj otopini NaCl. Vizualnim pregledom uzoraka nakon izlaganja, uočen je vrlo mali broj mjehurića na

uzorku A1 (u Tablici 35. označeni crvenim krugovima), dok na uzorku B2 nisu zabilježene nikakve promijene na samoj površini premaza.

Tablica 35. Uzorci A1 i B2 prije i nakon elektrokemijskog ispitivanja

Uzorci	PRIJE	POSLIJE
A1		
B2		

9.4.1. Mjerenje korozijskog potencijala, E_{kor}

Korozijski potencijal označava potencijal pri kojemu su brzine odvijanja anodne i katodne reakcije jednake. Kako su brzine anodne i katodne reakcije ovisne jedna o drugoj, smanjenjem jedne od dviju tih reakcija smanjuje se i ukupna brzina korozije. Ako se u određenom vremenskom roku vrijednosti potencijala mijenjaju od negativnijeg prema pozitivnijem, dolazi do spontane pasivacije uzorka. Ukoliko se vrijednosti potencijala ne mijenjaju ili se one s vremenom kreću prema negativnim vrijednostima, dolazi do razaranja materijala i ubrzane korozije [27].

E_{kor} , odnosno elektrokemijski potencijal određen je nakon 16 minuta, a očitane vrijednosti korozijskog potencijala uzoraka A1 i B2 prikazane su u Tablici 36..

Tablica 36. Vrijednosti korozijskog potencijala E_{kor} uzoraka A1 i B2

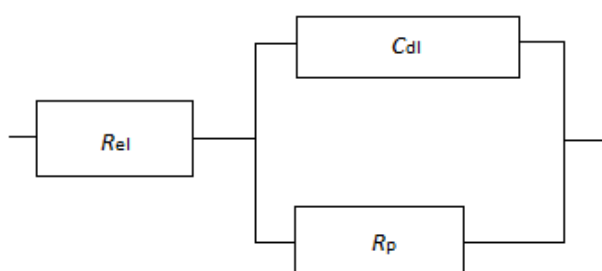
Uzorak	E_{kor} vs. Hastalloy C276 [mV]
A1	154,886
B2	19,015

Iz rezultata je vidljivo, a kao što je bilo i za očekivati, da se uzorci A1 i B2 ponašaju poput plemenitih metala, odnosno s obzirom da se radi o premazima imaju pozitivniju vrijednost potencijala u odnosu na vodikovu elektrodu te pružaju dobru korozijsku zaštitu.

9.4.2. Mjerenje otpora premaza, R_p

Glavna prednost EIS-a je predodžba elektrokemijske ćelije elektroničkim modelom. Međufazna granica elektroda/elektrolit, na kojoj se odvija elektrokemijska reakcija, analogna je električnom krugu koji se sastoji od kombinacije otpora i kapaciteta. Metoda EIS-e zasniva se na mjerenju impedancija u širokom spektru frekvencija tj. sinusoidalnog signala, najčešće od 0,01 Hz do 100 kHz [28].

Električni ekvivalentni krug za jednostavan elektrokemijski sustav, kao što je i onaj s uzorcima sustava premaza A i B uzoraka sustava premaza A i B prikazan je na Slici 44., gdje R_{el} predstavlja otpor elektrolita, R_p otpor premaza, a C_{dl} kapacitet premaza [28].



Slika 44. Električni ekvivalentni krug elektrokemijskog sustava za sustave premaza A i B [29]

Postavljeni parametri za mjerenje otpora u software-u su bili potpuno jednaki kod ispitivanja oba uzorka, A1 i B2 (Tablica 37.). Rezultati ispitivanja prikazani su u Tablici 38.

Tablica 37. Parametri za mjerenje otpora

Amplituda [mV RHS]	100
Početna frekvencija [Hz]	10000
Konačna frekvencija [Hz]	1
Referentna elektroda	Hastalloy C275 , + 0,223 V

Tablica 38. Rezultati EIS uzoraka A1 i B2

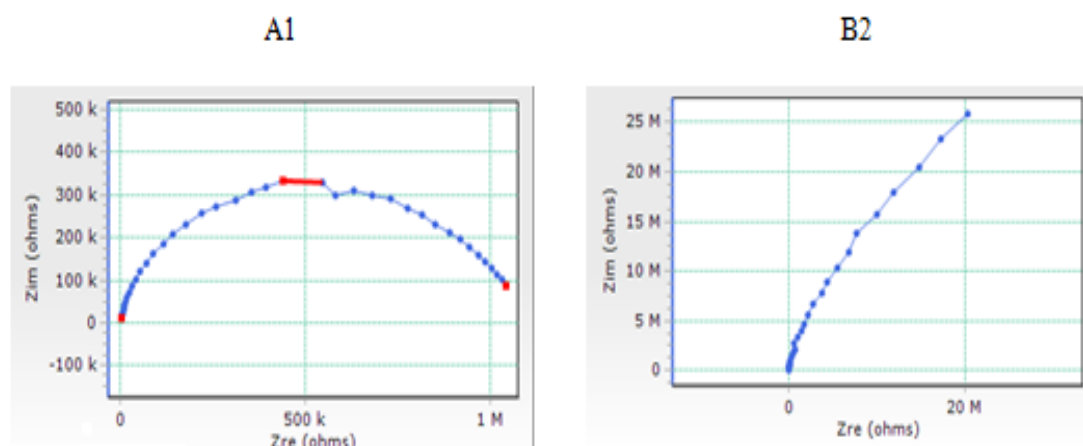
Uzorak	Otpor premaza, R_p [MΩ]	Otpor elektrolita, R_{el} [kΩ]	Kapacitet premaza, C_{dl} [F]
A1	1,046	11,993	0,956
B2	32,87	15,154	0,03

Rezultati pokazuju kako sustavi premaza B, na bazi otapala, pružaju znatno veći otpor elektrokemijskoj koroziji u odnosu na premaze na bazi vode. Razlog leži u činjenici da je sustav premaza B trokomponentan pa ima manji broj pukotina, a samim time i skoro nikakva propuštanja.

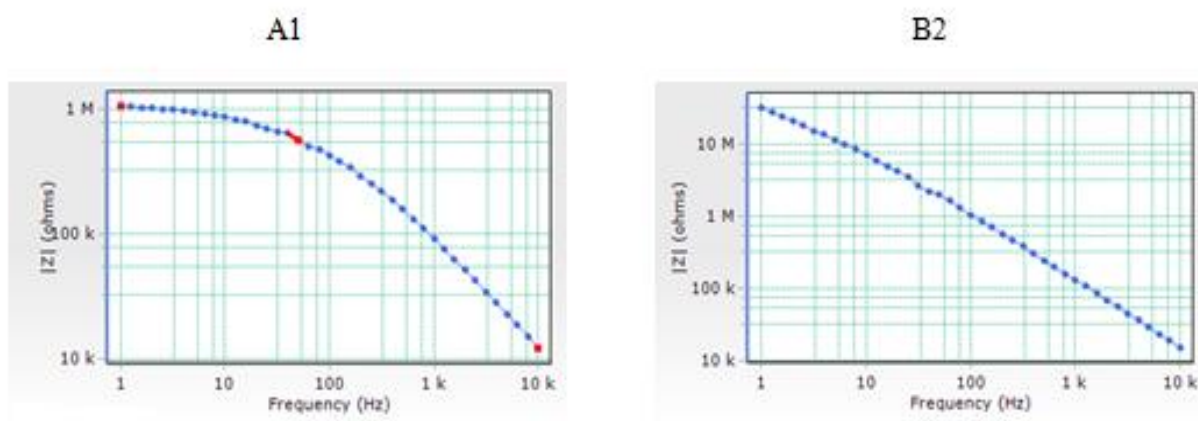
Najčešći oblik prikazivanja dobivenih podataka otpora je Nyquist-ov prikaz impedancijskog spektra, koji predstavlja ovisnost imaginarne komponente impedancije Z_{imag} , u odnosu na realnu komponentu, Z_{real} , za svaku pobudnu frekvenciju. Kao nadopuna Nyquist-ovom dijagramu, drugi način prikazivanja impedancijskog spektra je Bode-ov dijagram, koji prikazuje ovisnost logaritma apsolutno vrijednosti impedancije $|Z|$, i faznog kuta φ , o logaritmu frekvencije f . Bode-ov dijagram nam omogućuje i računanje kapaciteta premaza, C_{dl} (1) [28].

$$|Z| = \frac{1}{C_{dl}} \quad (1)$$

Grafički prikaz rezultata elektrokemijske impedancijske spektroskopije uzoraka A1 i B2 s pripadajućim Nyquist-ovim i Bode-ovim dijagramima prikazani su na Slikama 45. i 46..



Slika 45. Nyquist-ovi dijagrami za uzorke A1 i B2



Slika 46. Bode-ovi dijagrami za uzorke A1 i B2

9.5. Mikrostrukturna ispitivanja

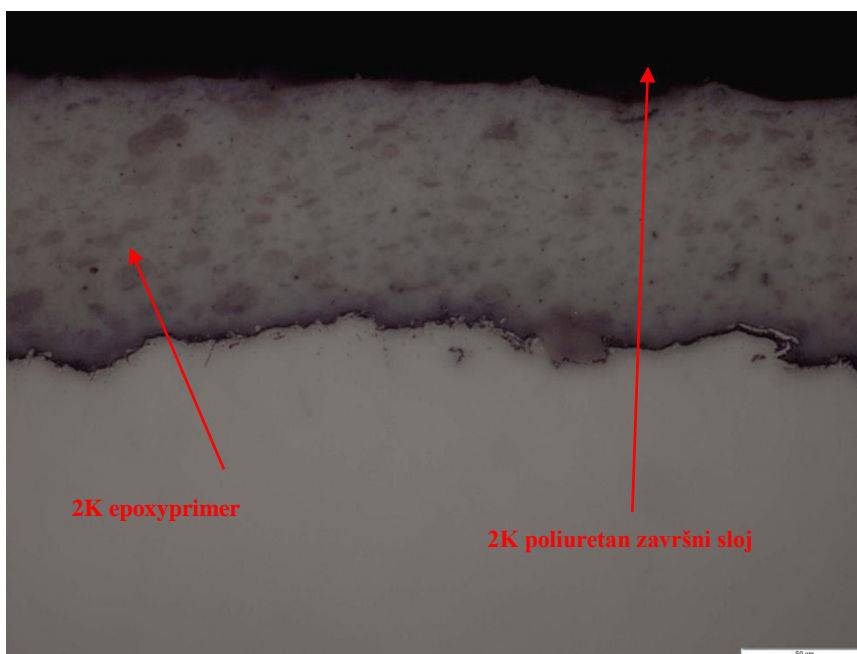
U sklopu mikrostrukturnih ispitivanja, u Laboratoriju za materijalografiju, provedena je analiza mikrostrukture materijala uzoraka sustava premaza A i B na optičkom svjetlosnom mikroskopu te mikrokemijska analiza površine istih uzoraka skenirajućim elektronskim mikroskopom (SEM) uz EDX analizu (eng. *Energy Dispersive X-Ray*). Prije analize mikrostrukture sustava premaza optičkim svjetlosnim mikroskopom, uzorci su obrađeni i preliveni pastom u zajednički odljevak pogodan za mikrostrukturna ispitivanja (Slika 47.).



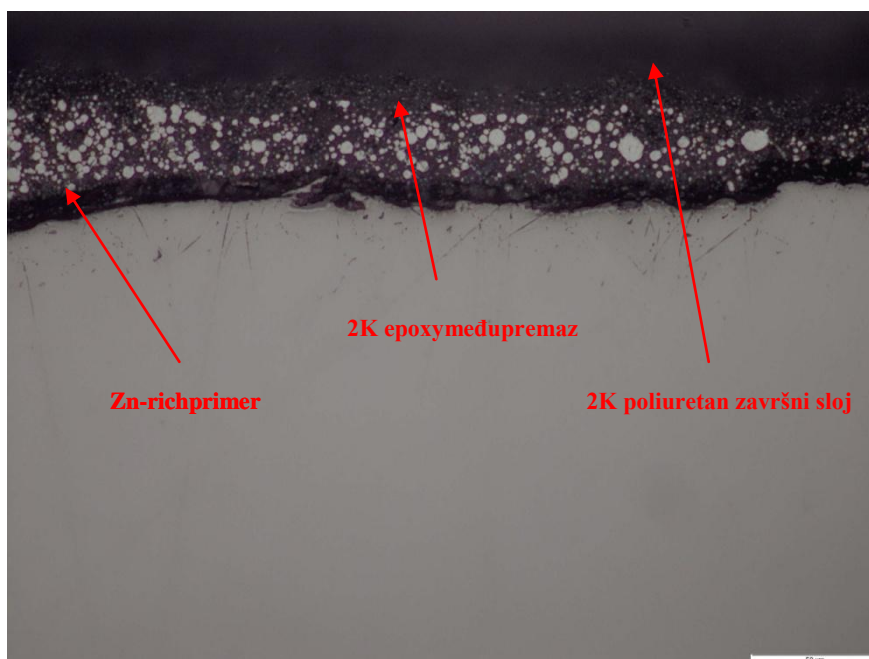
Slika 47. Pripremljeni uzorci sustava premaza A i B za mikrostrukturna ispitivanja

9.5.1. Određivanje mikrostrukture optičkim svjetlosnim mikroskopom

Mikrostrukturna ispitivanja sustava premaza provedena su optičkim svjetlosnim mikroskopom Olympus GX51 s povećanjem od 500 puta (Slika 48. i Slika 49.).



Slika 48. Mikrostruktura sustava premaza A, povećanje 500 x



Slika 49. Mikrostruktura sustava premaza B, povećanje 500 x

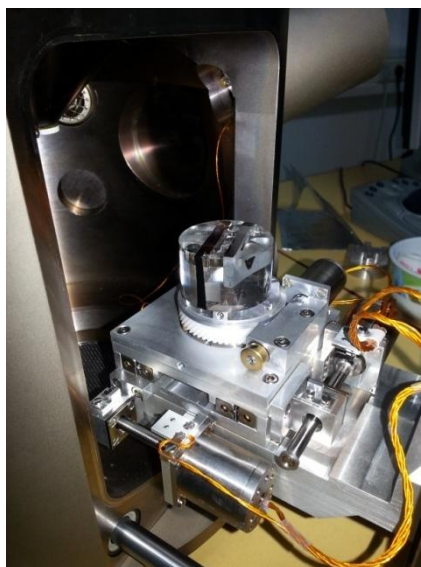
Iz analize mikrostrukture sustava premaza jasno se vide pojedini slojevi premaza. Tako je na Slici 48., mikrostruktura sustava premaza na bazi vode, jasno vidljiva granica između temeljnog epoxy premaza i završnog poliuretana. Kod sustava premaza B, na bazi otapala, jasno se mogu razdvojiti tri komponentne premaza: Zn-rich temeljni premaz, epoxy međupremaz i završni poliuretan.

9.5.2. SEM i EDX analiza

Ispitivanje skenirajućim elektronskim mikroskopom uz EDX analizu provedeno je na uređaju Tescan VEGA 5136 MM, Oxford Instruments, Inca X-SIGHT (Slika 50.).

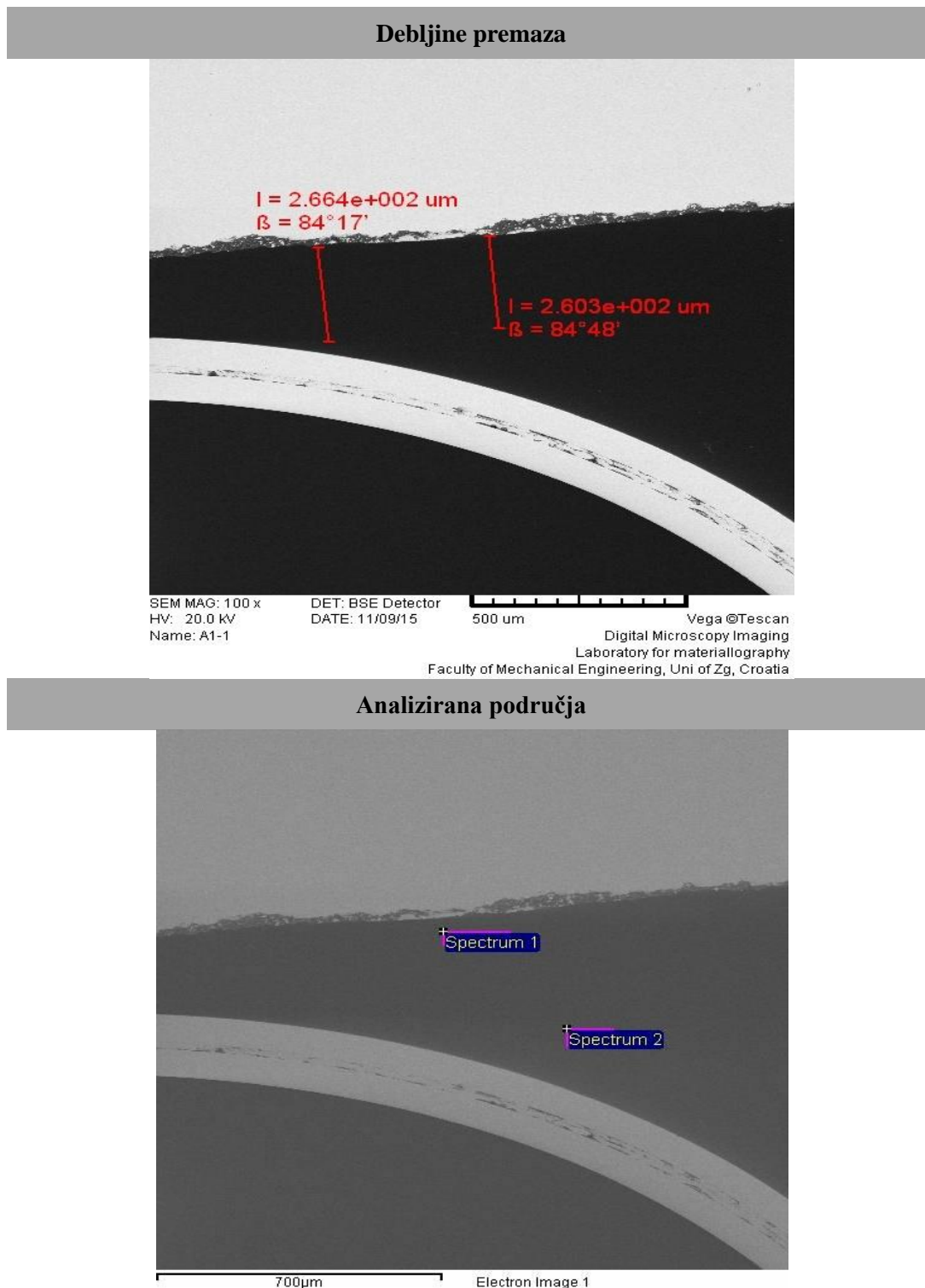


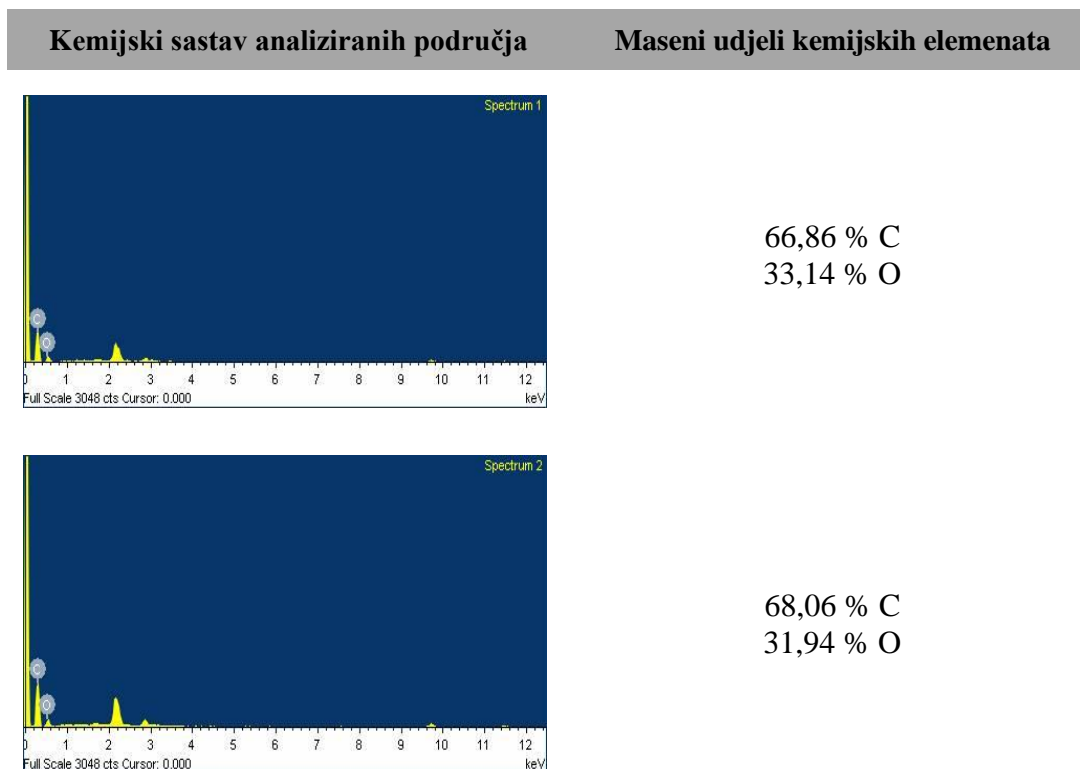
Slika 50. Skenirajući elektronski mikroskop



Slika 51. Postavljen uzorak u mjerni uređaj

Na Slici 51. prikazani su uzorci sustava premaza A i B, u vakuum komori, pripremljeni za ispitivanje skenirajućim elektronskim mikroskopom. Rezultati analize elementarnog sastava dobiveni su EDX analizom za sustav premaza A prikazani su na Slici 52.





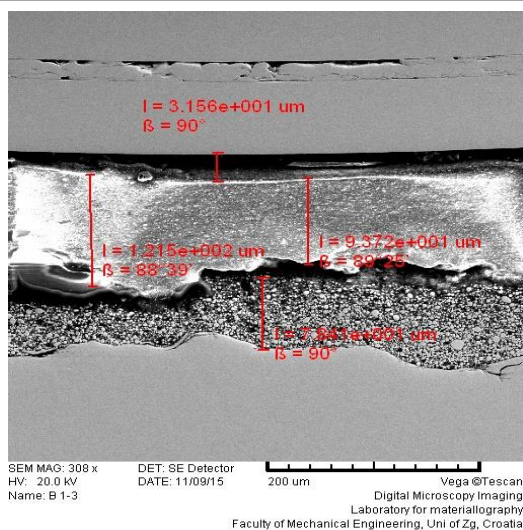
* na apscisi grafa kemijskog sastava analiziranih područja nalazi se energija vezanja, a na ordinati intenzitet a.u.

Slika 52. SEM i EDX analiza sustava premaza A

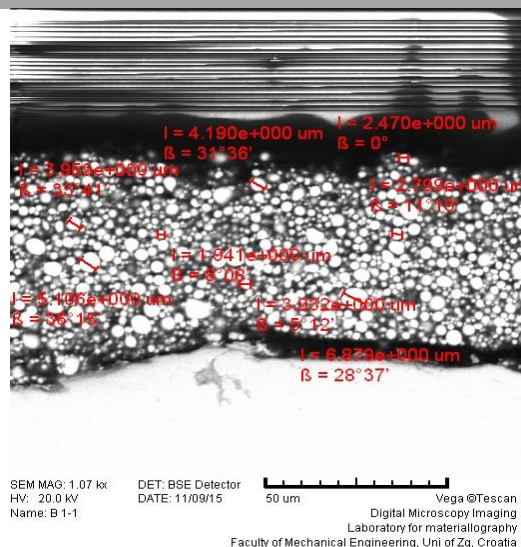
Na temelju rezultata ispitivanja može se zaključiti da ne postoji, okom vidljiva, jasna granica između dviju faza premaza tj. slojevi premaza djeluju vrlo kompaktno. Koncentracija elemenata sustava premaza A, odgovara kemijskom sastavu materijala. Debljine slojeva premaza odgovaraju vrijednostima debljina suhog filma iz Poglavlja 9.3.1. Manja odstupanja mogu se pojaviti uslijed hrapavosti površine.

Nadalje, rezultati ispitivanja sustava premaza B prikazani su na Slici 53. Osim debljine slojeva premaza te mikrokemijskog sastava analiziranih područja prikazane su i veličine cinkovih čestica.

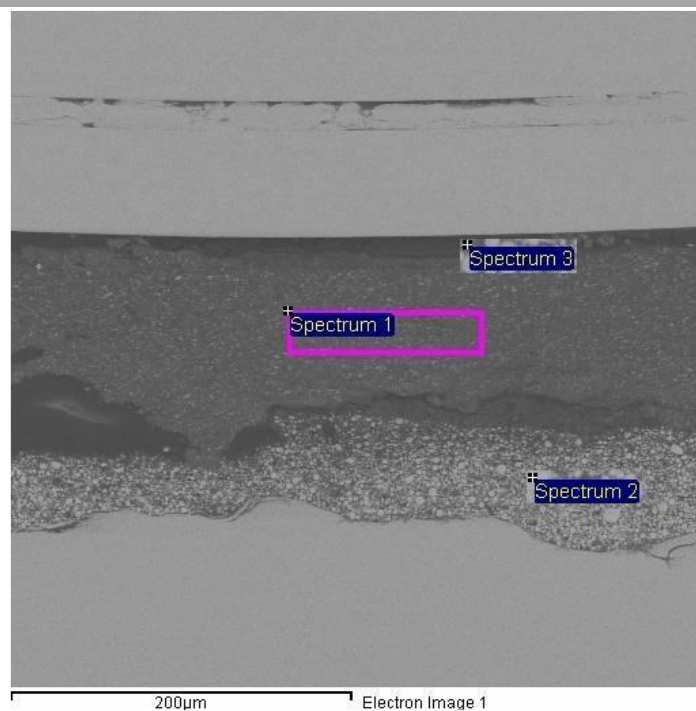
Debljine premaza



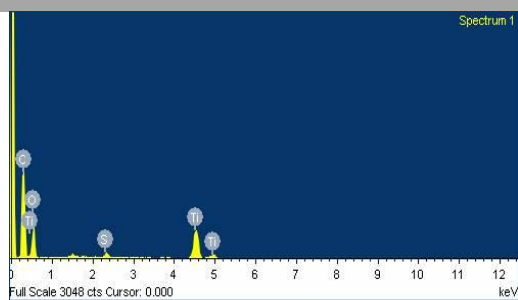
Veličina cinkovih čestica



Analizirana područja

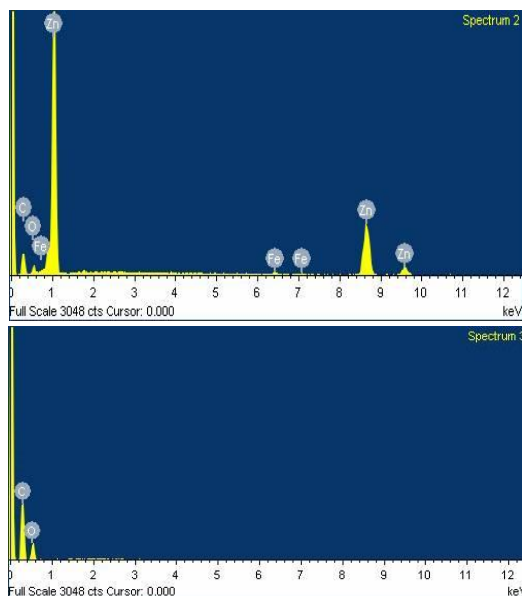


Kemijski sastav analiziranih područja



Maseni udjeli kemijskih elememnata

49,74 % C
38,47 % O
0,85 % S
10,95 % Ti



* na apscisi grafa kemijskog sastava analiziranih područja nalazi se energija vezanja, a na ordinati intenzitet a.u.

Slika 53. SEM i EDX analiza sustava premaza B

Za razliku od sustava premaza A, ovdje se jasno vide granice pojedinih slojeva premaza. Također, koncentracija elemenata, odgovara kemijskom sastavu materijala. Debljine slojeva premaza ne odgovaraju u potpunosti debljinama suhog filma prikazanima u Poglavlju 9.3.1. zbog hrapavosti površine uzoraka.

10. ZAKLJUČAK

Unatoč činjenici da premazi na bazi otapala nisu ekološki prihvatljivi, u zaštiti vjetroelektrana, još uvijek su korak ispred sustava premaza na bazi vode. Zbog sve oštrijih zakonskih regulativa, u pogledu ispuštanja emisija koje onečišćuju okoliš, sve se veća pažnja posvećuje razvoju premaza na bazi vode koji će pružiti dovoljno dobra antikorozivna svojstva za odgovarajuće uvjete korozivnosti.

Sustav zaštite čeličnih stupova jedan je od najzahtjevnijih zadataka prilikom osiguranja antikorozivne zaštite vjetroelektrana. Iako su najagresivnijim okolišnim uvjetima izložene *offshore* vjetroelektrane, vjetroagregati u blizini obale (od strane kopna) također su pod značajnim utjecajem agresivnih medija. Takvi uvjeti korozivnosti ocjenjeni su kategorijom korozivnosti C3-M, a predstavljaju priobalna područja niskog saliniteta. Za te su uvjete, u sklopu ovog rada, uspoređena dva sustava premaza, jedan na bazi otapala, a drugi na bazi vode, izloženi istim agresivnim uvjetima.

Na temelju provedenih fizikalnih i kemijskih ispitivanja, nakon izlaganja u vlažnoj i slanoj atmosferi, može se zaključiti da su:

- sustavi premaza na bazi vode pokazali su znatno bolju otpornost pojavi korozije u odnosu na sustav premaza na bazi otapala (na sustavu premaza na bazi otapala, nakon svakog ispitivanja, uočena je pojava mjestimičnih mjehura)
- iako su oba sustava premaza pokazala nepromijenjenu prionjivost nakon *crosscut* testa, ispitivanje prionjivosti *pulloff* testom pokazalo je da je sustav premaza A korozijski postojaniji od sustava premaza B.

Osim fizikalnih i kemijskih svojstava, ispitana su elektrokemijska svojstva, s fokusom na određivanje korozijskog potencijala i otpora premaza te je zaključeno:

- iako je izloženost 3,5 %-tnoj otopini NaCl imala znatno veći utjecaj na sustav premaza na bazi vode, gdje su se pojavili mjestimični mjehurići, oba sustava premaza pokazala su dobru korozijsku otpornost ponašanjem poput plemenitih metala

- mjerenje otpora premaza rezultiralo je činjenicom da, uslijed većeg broja komponenti premaza, sustav premaza na bazi otapala pruža znatno veću otpornost elektrokemijskoj koroziji.

Provođenjem fizikalnih, kemijskih i elektrokemijskih ispitivanja dokazano je da će, unatoč još uvijek rijetkoj primjeni u zaštiti čeličnih stupova vjetroagregata, sustavi premaza na bazi vode, izloženi istim uvjetima kao i sustavi premaza na bazi otapala, dati ista, ako ne i bolja svojstva i korozijsku postojanost. Ovime se može zaključiti da će u skorijoj budućnosti sustavi premaza na bazi vode imati sve veću ulogu u zaštiti, ne samo čeličnih stupova vjetroagregata, već i ostalih dijelova konstrukcija, a s vremenom će i potpuno zamijeniti premaze na bazi otapala.

LITERATURA

- [1] https://hr.wikipedia.org/wiki/Povijest_vjetroelektrana, (19.10.2015.)
- [2] Kurtela M.: Diplomski rad, Korozijski procesi, oštećenja i suvremeni sustavi premaza za offshore vjetroelektrane, 2014.
- [3] EWEA: Wind in power, 2014 European statistics, 2015.
- [4] EWEA: The European offshore wind industry- key trends and statistics 1st half 2015, 2015.
- [5] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Lidar>, (19.10.2015.)
- [6] Medvidović M.: Diplomski rad, Optimiranje samostalnog hibridnog sustava, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2010.
- [7] <http://www.power-talk.net/upwind-turbine.html>, (21.10.2015.)
- [8] <http://hr.wikipedia.org/wiki/Vjetroelektrana>, (21.10.2015.)
- [9] <http://i1-news.softpedia-static.com/images>, (21.10.2015.)
- [10] <http://atv.tm.free.fr>, (21.10.2015.)
- [11] <http://www.wind-works.org/cms/index.php?id=543>, (21.10.2015.)
- [12] <http://watrnews.com/>, (21.10.2015.)
- [13] atrnews.com/wp-content/uploads, (21.10.2015.)
- [14] Vinković I.: Diplomski rad, Zagreb, 2009.
- [15] http://hr.wikipedia.org/wiki/Dijelovi_vjetroatregata, (23.10.2015.)
- [16] Guzović Z.: Uvod u energiju vjetra, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [17] <http://www.care2.com/causes/7-most-impressive-wind-farms-and-turbines-in-the-world.html>, (23.10.2015.)
- [18] <http://dingo.care2.com/pictures/causes/uploads/2013/11/london-array.jpg>, (24.10.2015.)
- [19] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/64/Kitegen.jpg> (24.10.2015.)
- [20] Juraga I, Alar V., Stojanović I.: Korozija i zaštita premazima, FSB, Zagreb, 2014.
- [21] Hempel Coatings (Croatia) Ltd.: Odabir odgovarajućeg sustava premaza, Smjernice za zaštitu u skladu sa ISO 12944
- [22] Mühlberg K. Hempel (Germany) Ltd.: Corrosion protection for windmills onshore and offshore, Cologne (Germany), 2004.

- [23] http://www.galvinform.com/Thermal_Spraying/images/windmill_drawing.png,
(24.10.2015.)
- [24] http://proceedings.ewea.org/ewec2009/allfiles2/334_EWEC2009presentation.pdf,
(27.10.2015.)
- [25] Marine Coatings Manual, Explanation to Product Data Sheets, 1411, 1995.
- [26] Tumara G.: Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2011.
- [27] Čavuzić M.: Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2013.
- [28] Petrović Ž.: Laboratorijske vježbe iz kolegija Mehanizmi elektrokemijske korozije i zaštite, FKIT, Zagreb, 2010.
- [29] Juneghani M. A., Farzam M., Zohdirad H.: Wear and corrosion resistance and electroplating characteristics of electrodeposited Cr-SiC nano-composite coatings, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran, 2012.

PRILOZI

- I. CD-R disc